

山地河川における土砂の波状移動と そのモデル化に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、集中豪雨による土砂流出・洪水災害のみならず、長期間に及ぶ流域スケールでの土砂移動現象が人間の生活や生産活動、水圏生物生態系に大きな影響を与えるようになってきた。そのために、流域内に分布する土砂の再移動特性を組み込んだ長期的な水系砂防計画の必要性が高まっている。通常の水系砂防計画は、既往土砂災害の統計資料から求めた流砂量や、特定の土砂移動を想定しない平衡状態で計算された流砂量に基づいて立てられることが多い。しかし、実際には時々刻々変化する土砂移動の長期観測データは少なく、長期間を要する流域スケールでの土砂移動の実態は十分に明らかにされていない。また、そのモデル化やそれに基づく流砂量予測手法は、未だに構築されていない。

とくに山地河川は、斜面や支流から本流へ土砂が不連続に供給されるため、本流の河川流量と流砂量とが対応しない非平衡状態にある。また、供給される土砂の粒度分布範囲が広く、大径の礫が多量に含まれるため、平常流量で流砂量が少なくても洪水流量では急激に流砂量が増加することがある。従って、山地河川において長期間の流砂量を予測するためには、不連続な土砂供給による非平衡の土砂移動過程を解析する方法を開発することが必要となる。そこで、本研究では、河床変動を土砂の波状移動としてとらえる **sediment pulse** に着目した。**Sediment pulse** とは、斜面や支流から本流に供給された土砂が、出水に伴い下流へ移動するにつれて形成される土砂分布の粗密の差異によって生じる波形である。本研究では、本流河川における堆積土砂量の縦断分布を堆積曲線で表わし、その堆積曲線の波形解析より抽出される卓越成分から波状移動の特徴を求め、これを利用して流域スケールでの土砂移動現象をモデル化することを目的とした。また最後に、このモデルを用いて、水系砂防計画のための土砂移動コントロール手法の考え方を提案した。

まず、堆積曲線の波形解析を行うにあたって、堆積土砂の供給源を、山腹斜面や支流から新たに本流に流出した土砂 (**initial type**) と本流の河床浸食による再移動土砂 (**periodic type**) とに分けた。また、波状移動モデルのパラメータとして、擬似ストリームパワー(Ps)、供給土砂量(G)、土砂移動マグニチュード(M)を定義した。堆積曲線の波形の分類や土砂供給源との位置的關係を解析するために、自己相関分析と相互相関分析とを行った。

土砂供給源の違いによる堆積曲線の波形の差異を明らかにするために、主に側方から土砂が供給される尾札部川と主に本流の河床土砂が再移動する著保内川とを調査対象地とした。尾札部川では、側方からの土砂供給により堆積曲線に 4 つの初期 **sediment pulse** が見られた。著保

内川では、河床浸食による土砂の再移動により、堆積曲線にほぼ等間隔の3つのピークが見られた。自己相関解析によれば、尾札部川の堆積曲線には周期性が見られなかったが、著札内川の堆積曲線では自己相関係数が600~700mの周期で変動していることが分かった。相互相関解析によれば、尾札部川では土砂供給位置に対して堆積ピークが0~100m、400~500m、1200~1300mの位相ずれをもっていたが、著保内川では土砂供給位置と土砂堆積ピークが対応する様な位相ずれは見られず、異なる供給源からの土砂が混じりあって堆積していると考えられた。さらに initial type は、堆積曲線におけるピークの分布傾向から下降型、中間型、上昇型の3種類に区分できた。土砂供給の条件の違いを表すために、擬似ストリームパワー(Ps)と供給土砂量(G)との比(Ps/G)をとると、下降型では1.5~15、中間型では4~20、上昇型では7~34を示した。このことから、本流流量に対して側方からの土砂供給が過剰のときは下降型、反対に土砂供給が不足のときは上昇型を示し、下降型から上昇型への遷移タイプとして中間型が見られることがわかった。

側方から供給された土砂がその後本流に沿って再移動することによって、堆積曲線の波形と堆積土砂の粒径とが変化すると予想される。これを実証するため、北岩内二の沢川に観測地を設け、初期 sediment pulse の2005年9月降雨による変化について、粒径別の堆積土砂量分布を比較した。初期 sediment pulse では、3つの粒径階(4.75~19mm, 19~75mm, 75~300mm)の全てにおいて、土砂供給地点から500m下流で堆積ピークを示した。しかし、2005年9月の出水によって、4.75~19mmでは1700m、19~75mmでは700m、75~300mmでは100mと粒径階ごとに堆積曲線ピークにずれが発生した。さらに、2005年9月以降の小規模な出水で、堆積曲線は再び変化し、75mm未満の土砂が移動している。これに伴って、堆積曲線はピーク高が低く(20~140m³)、ピーク間隔が長い(400~1150m)波形へと変化した。

次に、モデル化を行うために、初期 sediment pulse の時間的変化を水理実験によって再現し、実験から得られた堆積土砂量をガンマ分布を用いて堆積曲線として表現した。ガンマ分布で推定した堆積曲線と実河川で得られた堆積曲線とはいくつかのピークで一致しないため、その差分を流下距離に換算する方法を提案し、換算値を相当距離(L)と定義した。相当距離は、擬似ストリームパワー(Ps)と洪水流下幅(B)の比との回帰分析より算出した。ガンマ分布と相当距離を用いた初期 sediment pulse モデルを、現地河川から得られた堆積曲線に適用した結果、ほぼ一致した。

また本流の河床浸食による再移動土砂についても、堆積曲線が複数の供給源からの土砂移動によって形成されていることから、初期 sediment pulse モデルを適用した。その結果、堆積曲線のピーク高やその下流方向への変化を再現できた。そこで、sediment pulse の下流への影響を把握するため、初期 sediment pulse モデルを用いて計算を行った。その結果、土砂供給源付近における堆積曲線のピーク高は、下流へ進むに従って減少した。また下流域では上流域の波状移動が遅れて現れ、sediment pulse は長期に渡って本流河川全体に影響することが明らかになった。

最後に、長期間にわたる流域スケールでの土砂移動コントロール手法として、家屋などの保全対象より上流では堆積曲線の振幅を増加させ、保全対象の近くではその振幅を減少させることによって、sediment pulse の無害化を図ることが必要と考えられた。具体的には、土砂の波状移動の速度を低減させるような横工群の施工、河道掘削による流下幅の拡幅、小規模な堰堤

工（床固工など）による勾配緩和と洪水の流下幅を拡幅して土砂堆積を促進させることが有効であると考えられた。

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 山 田 孝

学 位 論 文 題 名

山地河川における土砂の波状移動と

そのモデル化に関する研究

本論文は5章からなり、図32、表9、写真1を含む135ページの和文論文である。他に参考論文2編が添えられている。

近年、河川上流域への人間活動の拡大と水辺環境の整備に伴い、流域全体にわたる長期間の土砂移動を解明することが重要な課題となっている。しかし、その基礎となる流砂量の算出方法は、これまでは降雨資料に基づく平衡状態を想定しているため、多様な土砂生産源をもつ山地河川での非平衡な土砂移動には利用できない。不連続な土砂供給と非平衡な土砂移動過程のもとでの流砂量の予測手法を開発することが求められている。

本研究では、本流河川に沿う堆積土砂量分布を堆積曲線で表わし、堆積曲線の波形変化を土砂の波状移動 (sediment pulse) として把握した。この波形の卓越成分から sediment pulse の特性値を求め、これを用いて流域スケールでの土砂移動過程をモデル化することを目的とした。また、作成されたモデルを用いて、水系砂防計画のための土砂移動コントロールの基本的な考え方を提案した。

最初に、sediment pulse を生成する土砂供給源として、山腹斜面や支流から本流に流出した土砂 (initial type) と本流の河床浸食による再移動土砂 (periodic type) とを区分した。また、sediment pulse の形成要因である擬似ストリームパワーと土砂供給源との位置関係を解析するために、自己相関分析と相互相関分析とを行った。

土砂供給源の差異による堆積曲線の波形変化を抽出するために、側方からの土砂供給が卓越する河川 (尾札部川) と本流河床の再移動が卓越する河川 (著保内川) とを調査対象とした。尾札部川では、側方からの土砂供給により堆積曲線に4つのピークが見られ、著保内川では、河床浸食による土砂再移動により、ほぼ等間隔の3つのピークが見られた。自己相関解析によれば、尾札部川の堆積曲線には周期性が見られなかったが、著保内川では一定周期で自己相関係数変動していることが分かった。相互相関解析によれば、尾札部川では土砂供給地点に対して堆積ピークが3種類の位相ずれをもっていたが、著保内川では土砂供給地点と土砂堆積ピークの間に位相ずれは見られず、異なる供給源からの土砂が混合していることが示唆された。

さらに、Initial type においては、堆積ピークの違いから下降型、中間型、上昇型の 3 種類が区分された。これら 3 種の類型において、土砂供給地点での水理条件を表わす擬似ストリームパワーと供給土砂量との比を見ると、下降型 $\leq$ 中間型 $\leq$ 上昇型となった。すなわち、本流流量に対して側方から土砂供給過剰のときは下降型、反対に土砂供給不足のときは上昇型を示し、下降型から上昇型への遷移タイプとして中間型が見られることがわかった。

また、側方から供給された土砂が本流に沿って再移動する際には、堆積曲線の波形と堆積土砂の粒径とが変化する。この現象について、北岩内二の沢川において 2005 年 9 月出水による初期 sediment pulse の変化について調べた。その結果、初期 sediment pulse ではいずれの粒径階においても同じ地点で堆積ピークを示したが、その後の出水により、粒径階ごとにピーク位置にずれが生じ、最後には、ピーク高が低く(20~140m³)、ピーク間隔が長い(400~1150m)堆積曲線に変化した。

次に水路実験において、初期 sediment pulse の時間的変化を計測し、ガンマ分布モデルを用いて堆積曲線として表現した。水路実験における堆積曲線と実河川における堆積曲線の適合性を高めるために、両者の差分を流下距離に換算する方法を提案し、これを相当距離(L)と定義した。ガンマ分布モデルと相当距離を用いて、水路実験による初期 sediment pulse モデルを現地河川における堆積曲線に適用した結果、両者の堆積ピークはほぼ一致した。

一方、periodic type の sediment pulse についても、上記のモデルを適用した結果、堆積曲線のピーク高やピーク位置を再現できた。そして、初期 sediment pulse の下流への変化について見ると、土砂供給源付近より堆積曲線のピーク高は減少しながら、時間遅れを伴って波形が伝搬することが明らかになった。

以上の結果に基づいて、土砂移動コントロールの基本的な考え方を提案した。すなわち、小規模な堰堤工(床固工など)と横工群の施工による勾配緩和と河道掘削による洪水流下幅の拡幅を組み合わせることで土砂堆積曲線の振幅を調節することによって、sediment pulse の無害化を図ることを提案した。

これら一連の成果は関連学会においても高い評価を受けている。よって、審査員一同は宮崎知与氏が博士(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。