

浮遊土砂の流出機構と微細土成分比率の 解析に基づく流域評価方法の構築

学位論文内容の要旨

1. 研究目的と研究方法

流域の土地利用改変や森林伐採などの人間活動がもたらす浮遊土砂流出が、地域の産業や生態系に影響を与えた場合、河川・森林管理者は早急な対策を講じることが求められる。しかし、浮遊土砂の流出機構が未解明でその評価手法も未構築であるために、対策実施と手法選択の判別はもとより地域住民への説明責任や改善策が果たせない状況下にある。流域保全を進展させる上で浮遊土砂流出機構の解明は緊急で必須な課題である。

森林流域、森林人為攪乱流域、森林以外の土地利用を対象とした個々の研究結果は、浮遊土砂流出（特に量的流出特性）に関する基礎情報を提供しているが、とくに浮遊土砂成分比率（無機・有機成分比など）と対策上重要な発生源については取り扱われていない。本論は、浮遊土砂の流域開発による流出機構とその発生源の変化について、現在まで未解明である浮遊土砂成分比率の解析によって明らかにするとともに、流域管理における評価手法と対策区分の判別方法を構築することを目的としたものである。

本論では、主に粒径 0.1mm 以下の微細土（TFS）と、それに含まれる有機成分（OFS）、無機成分（IFS）に着目した。流域土地利用変化における浮遊土砂特性を解明するために、森林流域（当別川水系一番川支流流域）、開発行為を受けた森林択伐流域（ヒバイイクシュンベツ川支流流域）と畑地流域（胆振地方貫気別川流域）を試験研究流域に設定した。各流域において、流量観測および無降雨時と降雨時の採水による浮遊土砂モニタリングを実施し、吸引濾過法と灼熱損量によって TFS と OFS の濃度をそれぞれ求めた。

2. 森林流域（基準流域）における浮遊土砂の流出機構と発生源

無降雨時の TFS 濃度オーダーは 10^0mg L^{-1} 以下で、降雨時でも最大で 10^2mg L^{-1} を示した。OFS 濃度は、無降雨時・降雨時ともに TFS 濃度と同オーダーであった。TFS 年流出量に占める OFS 割合は、両流域ともに 20% を超えていた。TSS（総浮遊物質）年流出量に占める TFS 割合は、両流域ともに 80% 未満であった。濃度－流量のヒステリシスから増水過程と減水過程における濃度時間変化に関わる要因（流量の時間変化、降雨強度、累積降水量）を重回帰分析により求め、IFS・OFS 発生源を推定した。その結果、溪岸侵食が両成分の主な発生源である流域と、溪岸侵食による両成分の流出に加えて周辺斜面部を発生源とする OFS 流出が加わる流域に区分された。両流域における TFS 流出特性の違いは、流量や土層厚分布・裸地面積率・流路勾配などに起因した発生源面積の違いによるものと考えられた。

3. 択伐流域（小規模攪乱流域）における浮遊土砂流出機構の変化

伐採実施年（2001 年）に観測された TFS 濃度オーダーは、無降雨時は伐採前（1997 年）と同じ 10^0mg L^{-1}

以下であったが、降雨時には最大で 10^3mg L^{-1} を記録し、平均濃度は伐採前の 50 倍以上に増加した。しかし伐採実施翌年（2002 年）には、平均濃度は伐採前の数倍にまで低下し、最大濃度も 10^1mg L^{-1} オーダーとなった。伐採前の OFS 濃度オーダーは、無降雨時で 10^0mg L^{-1} 以下、降雨時最大で 10^1mg L^{-1} を示した。伐採実施年の OFS 濃度オーダーは、無降雨時は伐採前と同じであったが、降雨時には最大 10^2mg L^{-1} まで増加し OFS 割合は 12% まで激減した。伐採実施翌年には OFS 濃度最大が 10^1mg L^{-1} オーダーにそして OFS 割合は 22% にまで回復した。対照流域との比較検討の結果、伐採実施年では TFS 濃度が高く OFS 割合が低い、伐採実施翌年には TFS 濃度の低下と OFS 割合の増加が確認された。伐採流域で観測された IFS 濃度と OFS 濃度の比 (I/O 比) と現地踏査結果から、TFS 発生源は主に溪流沿いに開設された集材路に起因した流路内堆積土砂と集材路盛土のり面であることが明らかになった。発生源である集材路における不安定土砂の安定化は、伐採前の TFS 流出状態にまで改善することが可能と考えられた。

4. 畑地流域（大規模開発流域）における浮遊土砂流出機構の特性

畑地流域河口部 TFS 濃度は無降雨時に 10^0mg L^{-1} オーダーであったが、降雨時には 10^3mg L^{-1} を記録した。同様に OFS 濃度オーダーは、無降雨時で 10^0mg L^{-1} 、降雨時で最大 10^2mg L^{-1} であった。TFS 年流出量に占める OFS の割合は 12% と低く、また TSS 年流出量に占める TFS 割合は 88.3% と高かった。畑地面積率の高い流域ほど、TFS 濃度とその流出量は高い値を示したが、これらの流域では、OFS 割合がともに 20% 未満と小さかった。畑地から流亡する土砂のため、畑地隣接域では $10,000 \text{mg L}^{-1}$ を超える TFS 濃度が検出された。林地と畑地の土壌物理性（土壌支持力の鉛直プロファイル、基準浸入能、飽和透水係数、間隙率）の比較解析から、畑地では表層ないし深度約 40cm に形成された硬盤層のため、飽和透水係数オーダーと間隙率がともに低く、とくに基準浸入能が畑地畝間で低い (1mm hr^{-1}) こと、さらに TSS 無機成分の粒度分布が畑地土壌と酷似し、しかも畑地土壌にのみ含まれていたクリストバライトが TSS 無機成分中に検出されたことなどから、浮遊土砂の発生源は主に畑地であることが確認された。この結果は、支流域スケールの TFS 濃度や流出量の違いが畑地面積率と対応したことも調和していた。そして、畑地農作業によって物理性が低下した土壌が畑地から流亡し、OFS 割合の少ない TFS が支川—本川河道を流下し、海域へと流送される微細土流出機構を明らかにした。

5. 流域開発による浮遊土砂の流出機構と微細土成分比率の変化特性

森林流域の浮遊土砂流出は量的に少ないこと、降雨時の成分比率については OFS 濃度変動に対する IFS 濃度変動が 2～3 倍で TSS に対する TFS 割合が小さいこと、TFS 発生源は溪岸部とその周辺斜面部であることなどが明らかとなった。一方、流域開発を受けた伐採流域や畑地流域では、浮遊土砂の約 90% は微細土であり TFS の流出量・濃度が高いこと、降雨時には IFS 流出量が多く IFS 濃度変動が大きい（濃度比 6 倍以上）ために OFS 割合が見かけ上低いこと、さらに流域における人為攪乱場が TFS 発生源であること、この発生源から流出する浮遊土砂の大部分が IFS で構成されていることなどが明らかとなり、したがって人為攪乱による浮遊土砂発生源の増大に伴った生態系影響要因としての無機成分増大・成分比率変化プロセスを定量的に解明した。

6. 流域評価方法の構築

本論で解明した浮遊土砂の流出機構と微細土成分比率の特性に基づいた、浮遊土砂流出特性に関する流域評価方法を構築した。すなわち浮遊土砂の量的流出特性を表す指標である濃度オーダー指数 (COI)、ならびに高出水の IFS と OFS の濃度比を利用した成分比指数 (CRI) を考案し、さらに COI と CRI を軸とした ratio-order ダイアグラムによる流域の評価ランク手法を提示した。また、このランク判別による流域区分

（保全流域、監視流域、対策流域）に即した管理方針と流出抑制対策の選択方法について提言した。

本論で得られた知見は、浮遊土砂に関わる問題解決の中で、その評価と対策実施の意志決定を図る上で、有益な情報をもたらすものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 新 谷 融
副 査 教 授 中 村 太 士
副 査 教 授 笹 賀 一郎
副 査 助 教 授 山 田 孝

学 位 論 文 題 名

浮遊土砂の流出機構と微細土成分比率の 解析に基づく流域評価方法の構築

本論文は、図33、表16を含む総頁数151の和文論文であり、他に参考論文8編が添えられている。

流域改変をもたらす浮遊土砂流出は、地域の産業や生態系に影響を与えるが、その機構が未解明で評価手法も未構築である。本論文は、流域開発による浮遊土砂の流出機構とその発生源の変化について、微細土成分比率解析によって明らかにするとともに、流域の評価手法と保全対策手法を構築することを目的としたものである。

1. 研究方法

森林流域、森林択伐流域と畑地流域を研究流域に設定し、流量観測および無降雨・降雨時の採水モニタリングによって、粒径0.1mm以下の微細土成分(TFS)とその有機(OFS)・無機(IFS)成分比率に着目し、流域土地利用変化における浮遊土砂流出の質的・量的特性の解析を行っている。

2. 森林流域における浮遊土砂の流出・発生源の解析

森林流域のTFS濃度は無降雨時に 10^0mg L^{-1} 以下(降雨時最大: 10^2mg L^{-1})で無降雨・降雨時ともにOFS濃度と同一オーダーであり、TSS(総浮遊物質)年流出量の80%弱がTFSでその1/3~1/2をOFSが占めるなど、森林流域における浮遊土砂流出特性の実態解明を行っている。さらに、降雨時の流量・TFS濃度ヒステリシス解析により、増・減水過程におけるIFS・OFS濃度への流量変化の強い寄与とともに、増水過程におけるOFS濃度への降雨強度と減水過程におけるIFS・OFS濃度への累積降雨量の寄与を確認している。したがってTFSの主な発生源はIFSが溪岸部、OFSが斜面部であること、溪岸侵食と溪岸・斜面侵食の流域区分は、土層厚分布・裸地面積率と斜面・流路勾配などの流域特性の違いに基づくことなどを指摘している。

3. 森林択伐流域における浮遊土砂流出機構の変化

森林択伐実施年の TFS 濃度オーダーは、降雨時に最大 10^3mg L^{-1} (平均濃度：択伐前の 50 倍以上) に増加するが、択伐実施翌年には最大で 10^1mg L^{-1} オーダー (平均濃度：択伐前の数倍) にまで低下すること、また OFS 濃度オーダーは、択伐実施年に降雨時最大 10^2mg L^{-1} まで増加するが翌年には択伐前降雨時最大の 10^1mg L^{-1} オーダーにまで回復することなどの観測結果を得ている。そして対照流域比較解析から、伐採実施年には TFS 濃度が高く (OFS 割合が低く) なるが翌年には TFS 濃度が低下 (OFS 割合が増加) すること、さらに微細土成分比率 (I/O 比) 解析と現地踏査判別から、TFS 発生源は溪流沿い集材路の開設に起因していることなどを明らかにしている。

4. 畑地流域における浮遊土砂流出特性

畑地流域の TFS (OFS) 濃度オーダーは無降雨時・ 10^0 (10^0) mg L^{-1} 、降雨時最大・ 10^3 (10^2) mg L^{-1} であり、TSS 年流出量の約 90% が TFS で OFS はそのうち 10% 強しか占めないこと、さらに畑地面積率の高い流域ほど TFS 濃度は高い (畑地： 10^4mg L^{-1} オーダー) などの実態を明らかにしている。さらに林地・畑地の土壌物理性の比較解析から、平均貫入抵抗値の高い硬盤層 (表層～深度約 40cm) が形成される畑地では飽和透水係数・間隙率が低く、とくに畑地畝間で基準浸入能が極めて低い (1mm hr^{-1}) こと、さらに粒度分析・X 線回折により TSS が畑地土壌と酷似したことなどから、浮遊土砂の発生源が主に畑地であることを確認している。

5. 流域開発による浮遊土砂の流出機構と微細土成分比率の変化

森林流域では浮遊土砂流出量は少なく、降雨時の微細土成分比率 (I/O 比) は 2～3 で溪岸部とその周辺斜面部がその発生源であるが、開発流域では浮遊土砂の約 90% を微細土が占め降雨時に IFS 流出量が増大する (I/O 比 6 以上) が、これは主に IFS で構成される人為攪乱裸地が TFS 発生源となるためとの知見を得ている。すなわち人為攪乱による浮遊土砂発生源の増大とこれに伴った無機成分増大 (I/O 比変化) 過程の量的・質的解明を行っている。

6. 流域評価方法の構築

浮遊土砂流出の量的特性指標として濃度オーダー指数 (*COI*) をそして質的特性指標として高出水時の I/O 比を用いた成分比指数 (*CRD*) を提示し、*COI*・*CRI* ダイアグラムによる流域評価手法を構築するとともに、本手法に基づいた流域区分方法 (保全、監視、対策) とこれに適合した管理・流出抑制策について提言している。

以上のように本研究は、浮遊土砂流出の質的・量的解析により、流域開発による微細土成分発生・流出機構を解明したものであり、その成果は学術・応用両面から高く評価される。よって、審査員一同は、佐藤弘和が博士 (農学) の学位を受ける十分な資格があるものと認定した。