

筑波大学大学院環境科学研究科 ○中村和央  
 筑波大学大学院生命環境科学研究科 眞板秀二  
 筑波大学大学院生命環境科学研究科 宮本邦明

1 はじめに

山地溪流特有の河床地形である階段状河床形 (step-pool) は、魚類や水棲昆虫等の生物に多様な生息場を提供しており、溪流生態系における重要な物理的環境となっている。また、階段状河床形はその破壊や形成、pool 部における土砂の貯留現象を通して、土砂の移動現象を支配している環境にもなっている。階段状河床形の状態は流量の変動に伴って、安定、変形、破壊、形成へと変化する。よって、階段状河床形の破壊や形成について把握することは溪流河床環境を理解する上で重要である。

著者は、長野県千曲川水系三沢川の源流の鞍骨川において、2004年10月下旬に洪水が発生した際、一部の場所で起こったstepの破壊と再形成を調査する機会に恵まれた。そこで、本研究では、stepの形状特性の把握とstepの破壊、形成過程について調査すると共に、その水理学的検討を行った。2 調査溪流の概要

調査溪流は、筑波大学川上演習林(長野県佐久群川上村)の中を流れる千曲川水系三沢川源流の一つの鞍骨流域である。その流域面積は0.378km<sup>2</sup>である。その溪流の中で階段状河床形のstepの破壊及び形成が確認された流域出口から上流へ91mの区間を調査した。その区間の下流部をL1区間(平均勾配7.5%)、中流部をL2区間(平均勾配8.3%)、上流部をL3区間(平均勾配9.0%)と呼ぶことにする。その区間である。また、流路幅は、1~2mであり、谷幅は約10~18mである。流域の出口の地点には、量水堰、雨量計が設置されており、流量、雨量の観測を行っている。

3 研究方法

河床地形の調査は、7年確率程度の洪水(ピーク流量(0.61m<sup>3</sup>/s))前後の2004年8月4日と2004年11月11日、15年確率程度の洪水(ピーク流量(0.89m<sup>3</sup>/s))前後の2006年7月13日と2006年9月28日の4時期に行なった。調査実施日とその調査時の測定項目を表1にまとめた。また、階段状河床形のstepの破壊と形成実態について、芦田ら<sup>1), 2)</sup>の研究成果を用いて水理学的に検討した。

表1 調査実施日と調査項目

観測日(年/月/日)	調査項目
2004/8/4	流路平面形, 河床縦断形, step構成礫径計測 ↑ 2004年10月の洪水(Q=0.61m <sup>3</sup> /s)により ↓ 下流区間でstepの破壊と形成を確認
2004/11/11	流路平面形, 河床縦断形, step構成礫径計測 ↑ ↓ 2005年7月3日に小規模洪水(Q=0.29m <sup>3</sup> /s)
2006/7/13	流路平面形, 河床縦断形, 河床横断形, step構成礫径計測, 河床材料計測 ↑ 2006年7月の洪水(Q=0.89m <sup>3</sup> /s)により ↓ 下流区間でstepの破壊と形成を確認
2006/9/28	流路平面形, 河床縦断形, step構成礫径計測

4 結果及び考察 4-1 河床地形の実態把握

2004年10月の洪水(ピーク流量(0.61m<sup>3</sup>/s))前後のstepの変化を2004年8月4日と2004年11月11日の測量結果を比較することにより把握する。その結果、中流部L2区間において、洪水前の4個のstepが破壊され、洪水後に新たに5個のstepが形成された。その洪水では、中流部L2区間でしかstepの位置の変化は見られなかった。

2006年7月の洪水(ピーク流量(0.89m<sup>3</sup>/s))前後のstepの変化を2006年7月13日と2006年9月28日の測量結果を比較し、その変化を把握する。上流部L3区間でのみ、stepの位置がほとんど変化していない。よって、L3区間では、その4時期でstepの破壊が見られなかった。

4-2 2004年と2006年の洪水時の土砂移動条件

2004年10月と2006年7月の洪水時のピーク流量に対する土砂移動条件を芦田ら<sup>1), 2)</sup>の方法により整理する。芦田ら<sup>1), 2)</sup>によると、階段状河床形の形成条件は、(1)河床材料が混合砂であること、(2)流れが射流であること(反砂堆の形成条件)、(3)初期河床の平均粒径  $d_m$  あるいはそれよりも大きい礫が移動すること、(4)最大粒径程度  $d_{max}$  の礫が形成過程を通じて停止することである(式(1))。

$$\tau_{*m} \leq \tau_{*cmax} \cdot \frac{d_{max}}{d_m} \dots (1) \quad \tau_{*cmax} = \left( \ln 19 / \ln \left( 19 \frac{d_{max}}{d_m} \right) \right)^2 \cdot \tau_{*cm}$$

ここに、 $h$  : 水深,  $\tau_{*m}$  : 平均粒径の無次元掃流力,  $\tau_{*cm}$  : 平均粒径の無次元限界掃流力,  $\tau_{*cmax}$  : 最大粒径の無次元限界掃流力である。水深はマンニングの平均流速公式と流路横断形から求める。(4)の条件を満たさない時、河床材料の最大粒径が移動し、階段状河床形の破壊とする。2004年10月の洪水によりstepの破壊と形成があった中流部L2区間を対象に、その洪水時のピーク流量に対する土砂移動条件の結果を図1に示す。ただし、河床材料の平均粒径は実測のstep以外の平均粒径6cm、最大粒径はstep構成礫の最大粒径平均の30cmを採用した。その他に、洪水時は流砂や河床が粗粒化されるとして、実測の平均粒径の2倍の12cmとした場合も検討した。平均粒径を実測の6cmとした場合は最大粒径が移動する領域にプロットされ、実態と同様に水理学的にもstepの破壊と形成が起こることを示している(図1)。平均粒径を12cmとした場合も、最大粒径が移動する領域にプロットされている(図1)。2006年7月の洪水によりstepの破壊がないL3区間を対象に、その洪水時のピーク流量に対する土砂移

動条件の結果を図2に示す。ただし、河床材料の平均粒径、最大粒径はそれぞれ実測の6cm、33cmを採用した。その他に、実測の平均粒径の2倍の12cmとした場合も検討した。実測の平均粒径6cm及びその2倍の12cmとした場合の両方も最大粒径が移動する領域にプロットされている(図2)。しかし、実際にはstepの破壊が生じなかった。よって、L3区間の実際の平均粒径は12cmより大きい可能性がある。

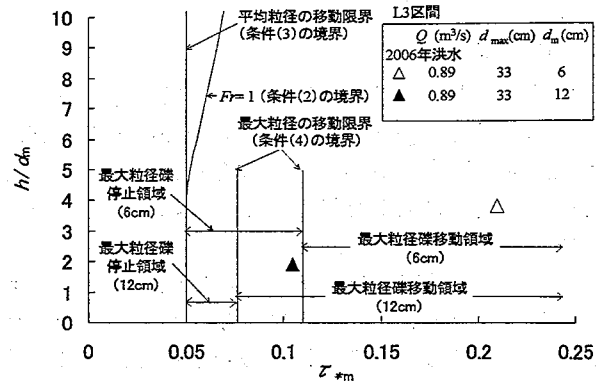
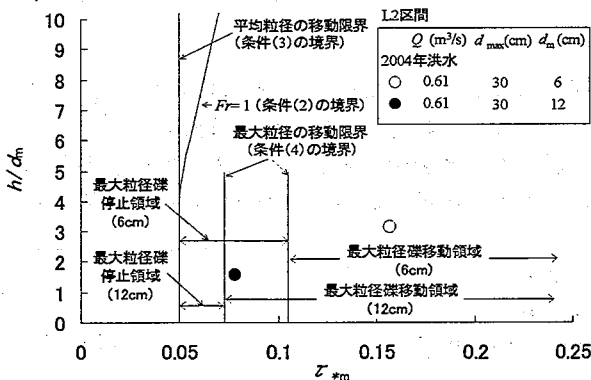


図1 2004年洪水時のstepの破壊及び形成領域 (L2区間) 図2 2006年洪水時のstepの破壊及び形成領域 (L3区間)

#### 4-3 階段状河床形の波長(step 間隔)に関する検討

形成時の階段状河床形のstep間隔は、反砂堆の波長 $\lambda$ にほぼ一致するとされ、Kennedy<sup>3)</sup>の式(式2)から求められるとされている。

$$Fr^2 = \frac{2 + k_* \tanh k_*}{k_*^2 + 3k_* \tanh k_*} \quad \text{ただし,} \quad k_* = 2\pi h / \lambda$$

ここで、 $h$  : 水深、 $Fr$  : フルード数、 $k_*$  : 無次元波数、 $\lambda$  : 階段状河床地形の波長である。

そこで、中流部L2区間において、2004年10月の洪水(ピーク流量(0.61m<sup>3</sup>/s))で新たに形成したそれぞれのstep間隔(1.8m, 2.1m, 2.4m, 2.4m)とその平均間隔(2.14 m)を使い、Kennedy<sup>3)</sup>の式と比較する。図3より形成したそれぞれのstepの間隔、その平均間隔はKennedyの式の周りにばらついている。よって、調査溪流でもstepの間隔についてKennedy式を用いて検討できると考えた。そこで、2004年10月の洪水で破壊がなかったL1区間とL3区間のstepについて、その平均間隔(2.88 m, 2.81m)を使い、5年確率、15年確率、20年確率以上の洪水に対応する水量からstepの形成流量を検討した。その結果、両区間ともstepの形成流量は0.9m<sup>3</sup>/s程度の流量(年超過確率率は15年確率程度)であると推察される(図4)。偶然にも2006年7月18日に0.89 m<sup>3</sup>/sのピーク流量(15年確率ピーク流量)の洪水があったので、stepの形成とその間隔について確認した(図5)。stepの破壊と形成があったL1区間では、そのstepの平均間隔は2.76(m)で、Kennedy式と一致している(図5)。したがって、stepの形成とその間隔はKennedyの式で説明できることが検証できた。

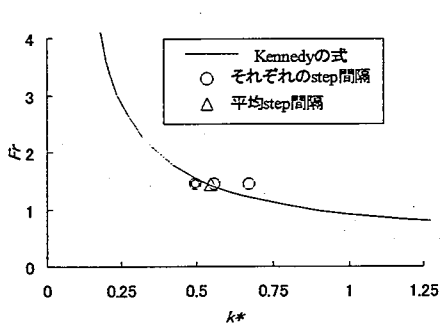


図3 2004年10月洪水時に形成されたstepの波数とフルード数との関係

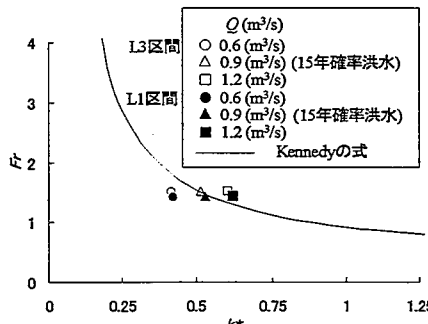


図4 L1, L3区間におけるstepの形成流量推定

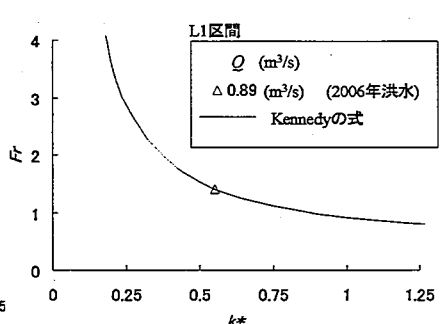


図5 2006年7月洪水時に形成されたstepの波数とフルード数との関係(L1区間)

#### 5 まとめ

- ① 洪水によるstepの破壊条件と形成条件は洪水時のピーク流量を用いて水理的に説明できた。
- ② 7年確率程度と15年確率程度の流量によりstepが破壊されなかった区間では、水理的な検討からアーマールコート(armour coat)の発達によりstepが安定化していることが示唆された。
- ③ 形成されたstepの間隔について、Kennedyの式を用いて説明できることが検証できた。

#### 6 引用文献

- 1) 芦田和男・江頭進治・安東尚美(1984) 階段状河床形の発生機構と形状特性, 京都大学防災研究所年報, 第27号(B2), 341-353.
- 2) 芦田和男・江頭進治・沢田豊明・西本直史(1985) 山地河川における階段状河床の構造, 京都大学防災研究所年報, 第28号(B2), 325-335.
- 3) Kennedy, J. F. (1963) The mechanics of dunes and undulations in erodible bed channels, *Journal of fluid Mechanics*, Vol. 16, Part 4, 521-544.