筑大演報第24号，1－36，2008

山地小流域渓流における階段状河床地形の形成・破壊の実態

中村　和央*・眞板　秀二**・宮本　邦明**

Actual condition of formation and destruction of step-pool sequences in a mountain stream of the small watershed

Kazuo NAKAMURA*, Hideji MAITA** and Kuniaki MIYAMOTO**

目　　次

第１章　はじめに …… 2
第２章　階段状河床地形 …… 3
第３章　研究対象地 …… 3
3.1　流域概要 …… 3
3.2　調査区間の概要 …… 4
3.3　流域の植生・地質・土壌・気象 …… 4
第４章　研究方法 …… 6
4.1　水文観測 …… 6
4.2　河床地形の区分と把握 …… 7
4.2.1　河床地形の区分 …… 7
4.2.2　河床地形の把握 …… 8
第５章　結果及び考察 …… 10
5.1　降雨・洪水の規模 …… 10
5.2　洪水による階段状河床地形の変化 …… 13
5.2.1　下流区間 …… 13
5.2.2　上流区間 …… 18
5.2.3　合流点下流区間，合流点上流区間 …… 19
5.3　洪水による河床材料変化 …… 20

＊ 筑波大学大学院環境科学研究科　The Master's Program in Environmental Sciences, University of Tsukuba
＊＊ 筑波大学大学院生命環境科学研究科　Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

5.3.1　下流区間 ……20
5.3.2　上流区間 ……26
5.3.3　合流点下流区間，合流点上流区間 ……28
5.4　階段状河床の形状特性 ……30
5.5　下流区間における階段状河床地形の破壊，形成と水理条件 ……32
第6章　おわりに ……34
引用文献 ……35
Summary ……35

第1章　はじめに

治山·砂防の対象とする山地渓流には，瀬-淵（riffle-pool）や階段状河床地形（step-pool）と呼ばれる小さな滝状の落ち込み（step）と小規模な淵（pool）が連続する河床地形が存在する。この階段状河床地形は，流水の流速に変化を与えることや，倒木や流下物を捕捉することによって，魚類や水棲昆虫などの渓流生物に多様な生息場を提供しており，河川生態系における重要な物理的環境となっている。また，階段状河床地形はその形成や破壊，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。階段状河床地形の状態は流量の変動に伴って，安定から変形，破壊，そして再び形成へと変化する。よって，階段状河床地形の破壊や形成について把握することは渓流環境や渓流の土砂移動現象を理解する上で重要である。

藤田・道上（1996）は，鳥取県千代川において，流量の増加に伴うstepの形成，破壊について検討した。その結果，現存する安定した階段状河床地形の波長は5年確率程度の流量に対応する反砂堆の波長に一致していること，その河床構造は数十年確率の流量に対しても破壊されないことを示した。このように，階段状河床地形は安定で，その構造が変化するようなイベントは数十年に一回程度の頻度でしか発生しないとされている。このため，実河川で洪水によって個々のstepがどのように破壊され，その後再びどのように形成されるのかについての実態は，ほとんど知られていない。

著者らは，長野県千曲川水系三沢川の源流の鞍骨川において，この十数年来，階段状河床地形の形状特性とそれを特徴づける因子との関連を検討してきた。2004年10月下旬に発生した洪水で，これまで調査してきた区間の一部でstepの破壊と再形成が見られた。また，その後の洪水による階段状河床地形の変化を追跡する機会を得た。そこで，本研究では，これまでその実態があまり明らかでなかったstepの破壊，形成の実態について，現地調査によって明らかにするとともに，stepの破壊，形成と水理量との関連について検討する。

第２章　階段状河床地形

河床地形は，二つに大きく区分される。河川上流部においては小規模河床波に分類される階段状河床地形（step-pool）が，中流部においては中規模河床波に分類される瀬-淵（riffle-pool）が見られる。瀬とは水深が浅く速い流れの部分，淵とは水深が深くてゆったり流れている部分とされている。これらは河床勾配の影響を強く受けており，両者の境界は峡谷と扇状地の境目に存在し，河床勾配が数％の部分であるとされている。また，粒径や流れの状態などによっても変化することが知られている（太田・高橋，1999)。

階段状河床地形は比較的大きな礫が流れ方向に垂直に並んで形成された段差（step）と，それらの間の小さな粒径砂礫で河床が構成されている小規模な淵（pool）が連続する河床形態である。階段状河床地形が見られる河川では，stepを越流して垂直に落ち込む流れと，poolによるよどみが相互に連続する特徴的な流れの構造となっている。階段状河床地形は，流域や河川の特性によってその形態や形成プロセスが違ってくることが考えられる。渓流で一般的に見られる階段状河床地形は，洪水時に粒径の大きい礫を含む堆積地が形成された後，中小洪水や平水時の流出によって，流量に応じた土砂が洗掘されて形成される微地形とされている（北村，1992)。また，めったに破壊されることのないような規模の大きい階段状河床地形の中に，これよりも規模の小さいものが形成されていることもある（芦田ら，1984)。この規模の大きなものは，かなり大きな出水によって形成され，これに重なって形成されている規模の小さな河床形は，その後の中・小出水，上流域及び渓岸からの供給土砂やその粒度分布に依存して形成されたと推察されている（芦田ら，1984)。

粒径の大きい礫を含む土砂で形成されている階段状河床地形のほかに，岩盤の河床が侵食されて形成される階段状河床地形もある。阿武隈川の峡谷区間では，勾配１％の区間に高さ平均３ｍの岩盤stepが300m間隔で存在する（池田，1996)。大井川の接阻峡では，岩盤河床上に岩壁から供給された砂岩の集積によるstepが形成され，下流が洗掘されてpoolが形成されている（池田，1996；藤田・池田，1996)。また，step構成材料として，礫や岩盤だけではなく，流木や倒木，落枝が礫と絡まって形成されるstep（log step）も存在する。

第３章　研究対象地

３.１　流域概要

研究対象地は，長野県佐久郡川上村矢出川（筑波大学農林技術センター川上演習林第２林班）に位置し，千曲川水系三沢川の源流の一つである鞍骨流域である（図－１)。ここは関東山地の最西端（北緯35° 55′，東経138° 30′）にあたり，東方には奥秩父連山がある。また西方には野辺山ヶ原を隔てて八ヶ岳の山塊がある。流域の最高地点は鞍骨の1786mである（写真－１)。流域は東西に細長く，流域面積は0.378km^{2}である。

地形は，標高1550m地点から急峻になり，それより下流は比較的緩やかで堆積土層が厚い（秋

山ら，2001)。基岩は，標高1480m地点から上流の河床や河岸に一部見られるようになり，崩壊は源頭部に見られるが規模は小さい。この渓流の流路幅は，１～２ｍと狭く，流路は堆積層が侵食されてできているため，洪水時も流路幅に大きな変化は見られない。谷底は約３～20mの幅を持つが，標高1495mの合流点より上流では谷底の幅は平坦部がほとんどないほど狭くなる。河床勾配は，大局的に見れば，量水堰の直上から標高1495mの合流点までは9.1%，それより上流は13.4%である。

対象流域の出口となる標高1440mの地点には，量水堰，雨量計，流域の中腹の標高1570mの地点には，雨量計が設置されており，流量，雨量の観測を行っている（図－１)。

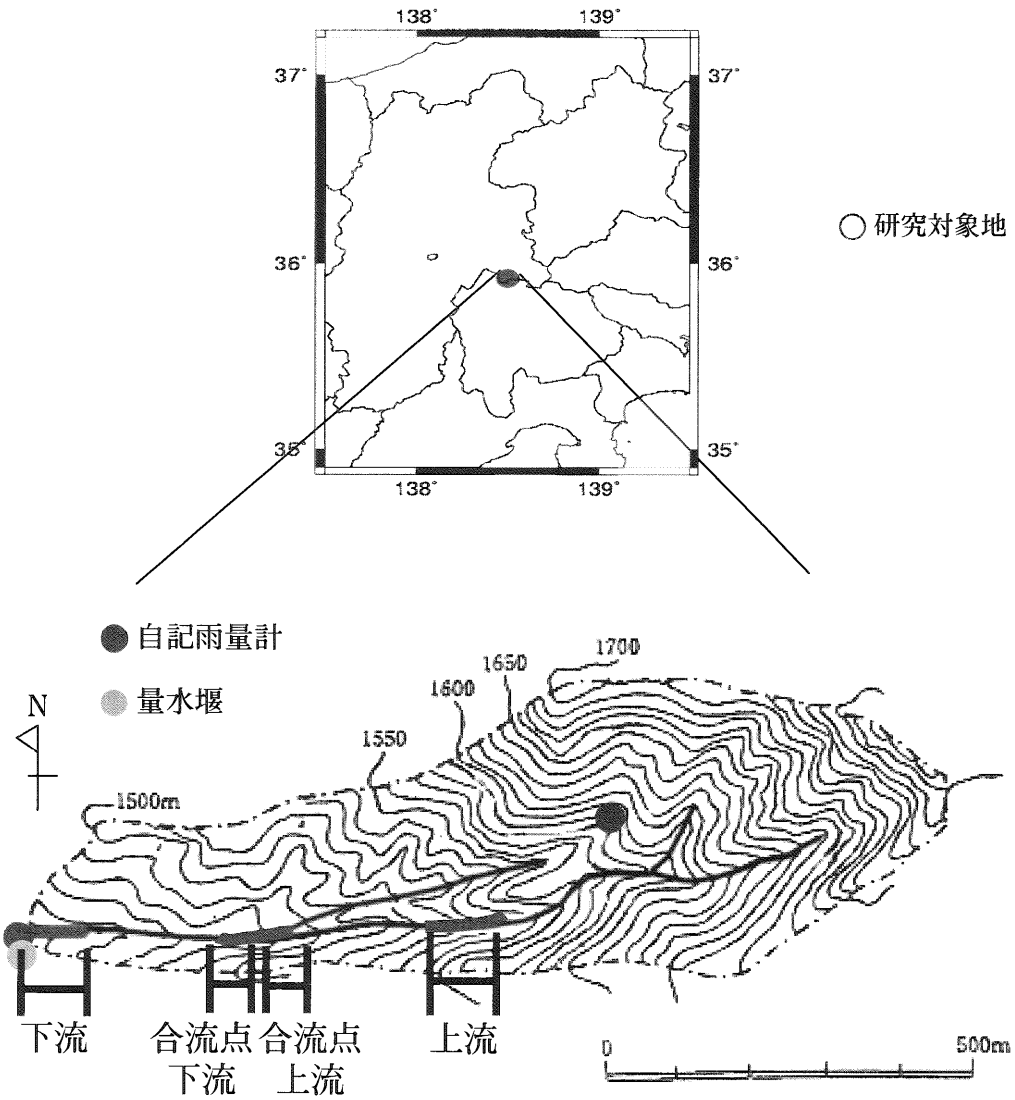
３.２ 調査区間の概要

図－１および表－１に示すように，下流区間，上流区間，その中間にある右支合流点下流の合流点下流区間，上流の合流点上流の４つの区間を調査区間として設定した。下流区間は量水堰の直上流からその上流91.2mまでの区間で，平均勾配は8.1％と比較的緩い。それに対して，上流区間の平均勾配は14%で，急勾配となっている。流域面積は下流区間で0.378km^2，上流区間で0.160 km^{2}となっている。下流区間の谷幅は10～18mと広く，流路が谷幅いっぱいに蛇行している（写真－２)。谷底の氾濫源には放棄された流路の痕跡が随所に見られ，流路の移動が激しいことを示している。一方，上流区間の谷幅は３～７m程であり，下流区間に比べ谷幅が狭くなっている(写真－３)。このため，下流区間に比べると流路は，ほとんど蛇行せず直線的である。右支合流点より下流32.9mまでの合流点下流区間の平均勾配は9.5%であるのに，合流点より上流33.4mまでの合流点上流区間の平均勾配は12.9%となっている。合流点を境にして勾配が大きくなっている（写真－４)。しかし，合流点下流区間と合流点上流区間の谷幅はそれぞれ３～８ｍと３～５ｍであり，谷幅に大きな違いは見られない。

３.３ 流域の植生・地質・土壌・気象

植生は，カラマツ，ストローブマツからなる人工針葉樹林とミズナラ，カンバ，カエデ類などからなる落葉広葉樹林で構成され，源頭部には一部草地も見られる。この流域はほぼ森林に被覆されて崩壊も少ないため，年平均の生産土砂量は10^{-2}～10^{-3}mmのオーダーであり（眞板，1996)，土砂流出はかなり少ない。

地質は新第三紀の飯盛山火山岩類に属する安山岩を基岩とする火山角礫岩からなる。表層は褐色森林土および黒色森林土からなり，土壌条件は良好である。平均気温は6.7℃，最高･最低の平均値はそれぞれ11.6℃，1.8℃で冷涼な気象条件となっている。冬季の冷え込みは特に厳しく，１～２月の平均最低気温は－5.2℃である。そのため，火山角礫岩は冬季の凍結破砕作用により風化が進んでいる。降雪量は少なく，地表面が低温にさらされる期間が長いため北向き斜面では土壌凍結が顕著である。年降水量は1420mmとあまり多くない。



図－１　研究対象渓流のある鞍骨流域

表－１　調査区間の概要

	下流区間	合流点下流区間	合流点上流区間	上流区間
区間距離（m）	91.2	32.9	34.4	83.8
高 低 差（m）	7.4	3.1	4.5	11.7
平均勾配（%）	8.1	9.5	12.9	14.0
谷底の幅（m）	10～18	3～8	3～5	3～7
流域面積（km^2）	0.378	0.283	0.176	0.160

流域面積以外の数値は2006年９月27日の実測値から求めた



写真－1　調査渓流の源流域



写真－2　下流区間の流路と周辺地形
（上流から下流をみる）



写真－3　上流区間の流路と周辺地形
（下流から上流をみる）



写真－4　合流点付近の流路と周辺地形
（下流から上流をみる）

第4章　研究方法

4.1　水文観測

流量観測は，標高1450mの流域出口に設置した量水堰で行い，雨量は，量水堰地点と上流域の標高1570mの地点に設置した転倒ます型雨量計で観測を行った。量水堰には直高1mの直角三角堰（ステンレス製刃型付）が設けてあり，この越流水深をフロート式自記水位計を使って自記紙に記録させるとともに，浮力式水位計を使ってデータロガーに収録した。量水堰の正面図を図－2に，設置状況を写真－5に示す。

このようにして得られた越流水深を(1)式および(2)式で示される沼知・黒川・淵沢の式（土木学会，1974）を用いて流量Q（m^3/s）に換算した。

$$Q = Ch_0^{5/2} \qquad (1)式$$

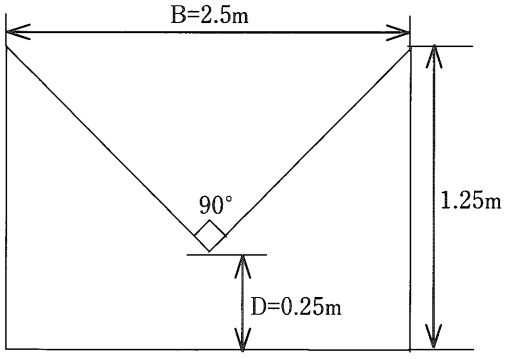
$$C = 1.354 + \frac{0.004}{h_0} + \left(0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{D}}\right)\left(\frac{h_0}{B} - 0.09\right)^2 \qquad (2)式$$

ここに，

h_0：越流水深，C：流量係数，B：堰の幅，D：堰底面よりＶノッチ底までの高さである。なお，設置した量水堰のBは2.5m，Dは0.25mである（図－４）。

対象区間の下流区間についての流量は，量水堰によって測定された流量を用いた。なお，上流区間，合流点下流区間および合流点上流区間については，流量が流域面積に比例するとして，量水堰設置個所の流域面積に対するそれぞれの区間の流域面積の比を量水堰設置個所の流量に乗じることにより推定した。

雨量は，量水堰に設置した転倒マス型雨量計の自記紙の記録から求めた。また，雨量及び流量の年超過確率は過去16年のデータをもとに求めた。



図－２　直角三角堰の正面図



写真－５　量水堰と雨量計

４.２　河床地形の区分と把握

４.２.１　河床地形の区分

本論文における階段状河床地形の定義を図－３に示す。礫が流路を横断するように並んでいて，垂直な落差がはっきりと認められる階段状の地形をstepとし，stepとstepの間の水の流れがよどんでいる地形をpoolとした。

階段状河床地形の構造については，step頂部と直下との比高で表す「step落差（あるいは波高）」，step頂部と直下部のstep頂部との比高で表す「step高」，stepとstepとの間の距離で表す

「step間隔（あるいは波長）」の３通りで定義した（図－３）。

stepは，基本的に礫の集積によって形成されるが，stepを構成する礫に落枝や倒木（CWD：Coarse Woody Debris）が絡まって形成されたstepや倒木により形成されたstep，岩盤でできたstepも存在する。本研究では，礫の集積によって形成されたstep（写真－６）を対象とした。

渓流周辺の地形は，斜面，氾濫源，渓岸，流路から構成されており，階段状河床地形は特徴的な「渓流河床地形」として認識される（図－４）。

４.２.２　河床地形の把握

階段状河床地形の平面形や縦断形を把握するために，平面測量，縦・横断測量を行なうとともに，stepの構造を把握するために，step構成礫径，河床材料粒径を測定した。さらに，渓流周辺の地形を把握するため，段丘や渓岸の河床からの高さや流路との位置関係を測定した。表－２，表－３に各調査区間の調査実施日と調査項目を示す。現地調査は，後述のように2004年10月，2005年７月，2006年７月に発生した洪水の前後に実施されており，各洪水による河床地形の変化を把握することができる。

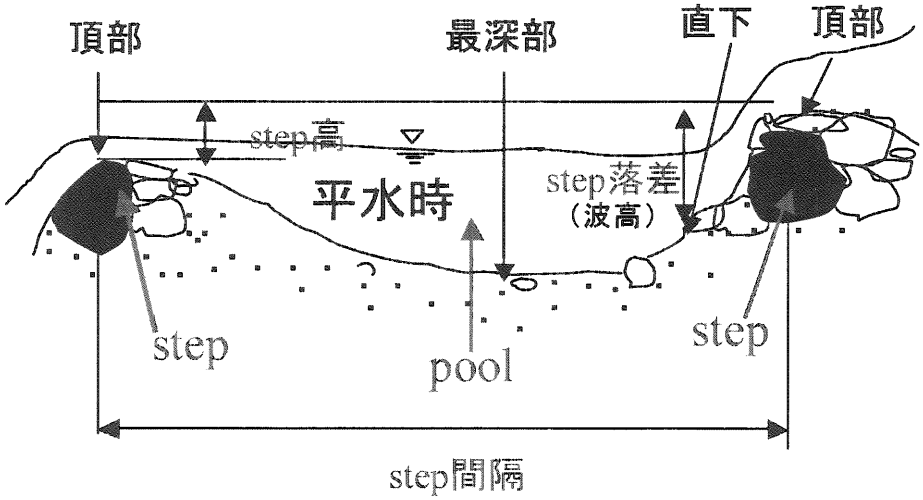
平面測量は以下のように行なった。コンパスを使って，流路中心の屈曲点ごとの方位角を求めるとともに屈曲点間の距離を測定して流路中心の平面位置を定めた。さらに各屈曲点の流路幅を測定することによって，流路の平面形状を把握した。

縦断測量は以下のように行なった。レベルを使って河床地形の変化点で水準測量を行い，その高さを測定した。特に，stepとpoolの縦断形を把握するために，図－３に示すstepの直下，頂部，pool最深部の各地点で水準測量を行った。それと同時に，既知の流路中心の屈曲点を用いて，各測点の平面位置を定めた。また，stepの幅とstep構成礫の粒径を測定した。なお今回は，長軸粒径のみを測定し，それを代表粒径としている。

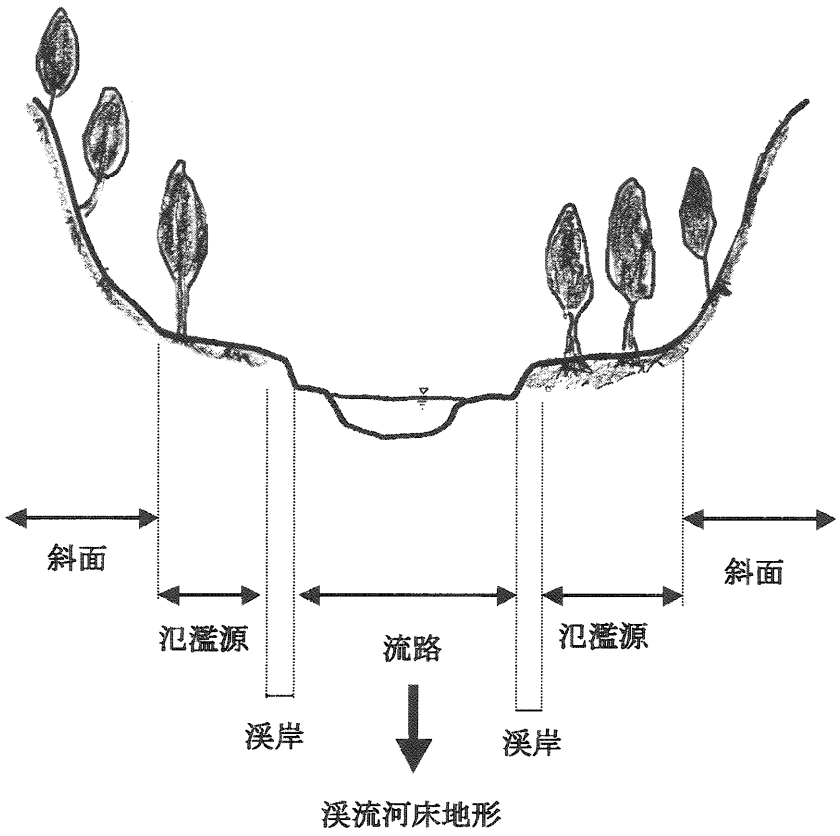
2006年７月洪水前の流路の横断形を把握するため，2006年７月13日に横断測量を行なった（表－３）。流路の横断方向に測線を決め，その測線上の変化点についてレベルを使って水準測量を行った。それと同時に，コンパスを使って，各測点の平面位置を定めた。

流路周辺の地形のスケッチは，下流区間では2004年10月洪水後の2004年11月11日に，上流区間，合流点下流，合流点上流区間では，2006年７月洪水前の2006年７月13日に行なった（表－２，表－３）。

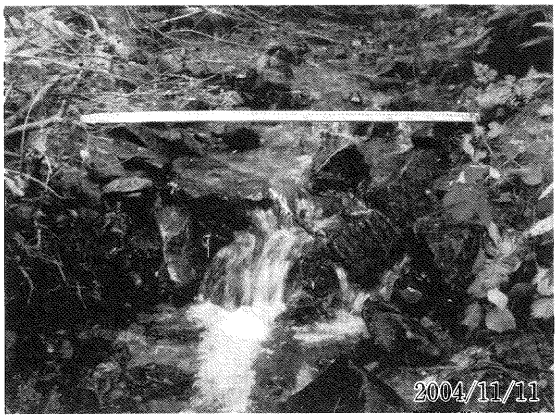
step以外の土砂堆積部における砂礫の表面粒径を2006年７月13日に線格子法を用いて計測した。すなわち，縦断方向に巻尺を張り，最大粒径程度の一定間隔で格点をとって，それらの格点下の粒径を測定する方法である。なお今回は，長軸粒径のみを測定し，それを代表粒径としている。



図－３　階段状河床地形とその構造



図－４　渓流地形の概念図



写真－6　礫step

表－2　下流区間における調査実施日と調査項目

調査実施日（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
2004/11/11	流路平面形，河床縦断形，step構成礫径，流路周辺地形
2006/ 7 /13	流路平面形，河床縦断形，step構成礫径，河床横断形，河床材料粒径
2006/ 9 /28	流路平面形，河床縦断形，step構成礫径

表－3　上流，合流点下流，合流点上流区間における調査実施日と調査項目

調査実施日（年/月/日）	調査項目
2006/ 7 /13	流路平面形，河床縦断形，step構成礫径，河床横断形，河床材料粒径，流路周辺地形
2006/ 9 /28	流路平面形，河床縦断形，step構成礫径

第5章　結果及び考察

5.1　降雨・洪水の規模

2004年8月4日から2006年9月28日までの量水堰における年最大24時間雨量（mm）とその再現期間，この期間の降雨に対するピーク流量（m^3/s）とその再現期間を表－4に示す。なお，量水堰地点の雨量を流域全体の雨量とみなした。

表－4にみられるように，2004年8月初めから2006年9月末にかけて，3回の洪水があった。2004年10月の洪水は2004年10月20日から21日にかけて発生した継続時間22時間，総雨量

147.5mmの降雨によるものである（図－5）。

この降雨の規模を年最大24時間雨量で評価すると，5年確率降雨に相当する（表－4）。また，この降雨によるピーク流量は0.61（m^3/s）となり，再現期間は7年程度となる。

2005年7月洪水は，2005年7月3日から4日にかけて発生した継続時間22時間，総雨量112.5mmの降雨によるものである（図－6）。この降雨の規模を最大24時間雨量で評価すると，2年の確率降雨に相当する（表－4）。また，この降雨によるピーク流量は0.17（m^3/s）となり，再現期間は2年となる。

2006年7月洪水は，2006年7月18日から19日にかけて発生した継続時間56時間，総雨量325mmの降雨によるものである（図－7）。この降雨の規模を最大24時間雨量で評価すると，10年確率降雨に相当する。また，この降雨によるピーク流量は0.89（m^3/s）となり，再現期間は15年となる。

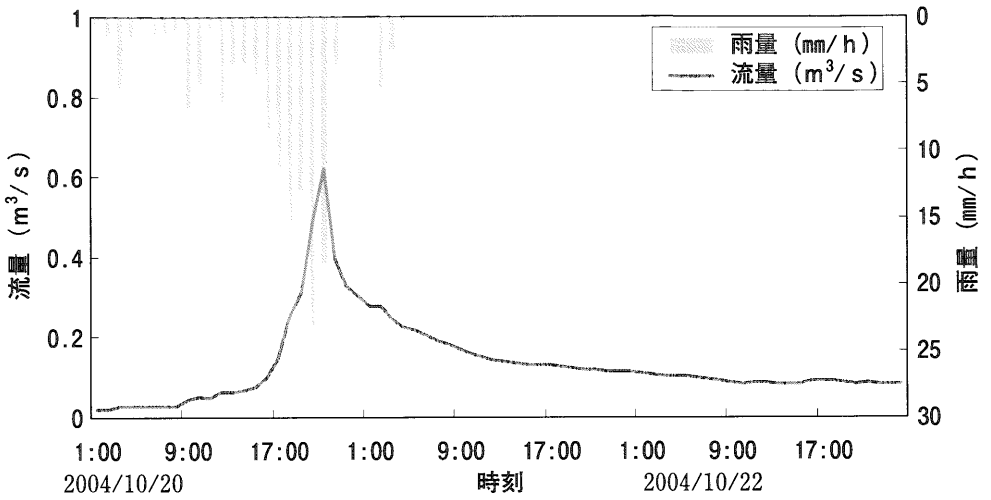
2006年7月洪水時の下流区間，上流区間，合流点下流区間，合流点上流区間におけるピーク流量を表－5に示す。

表－4　量水堰地点における年最大24時間雨量・ピーク流量と再現期間

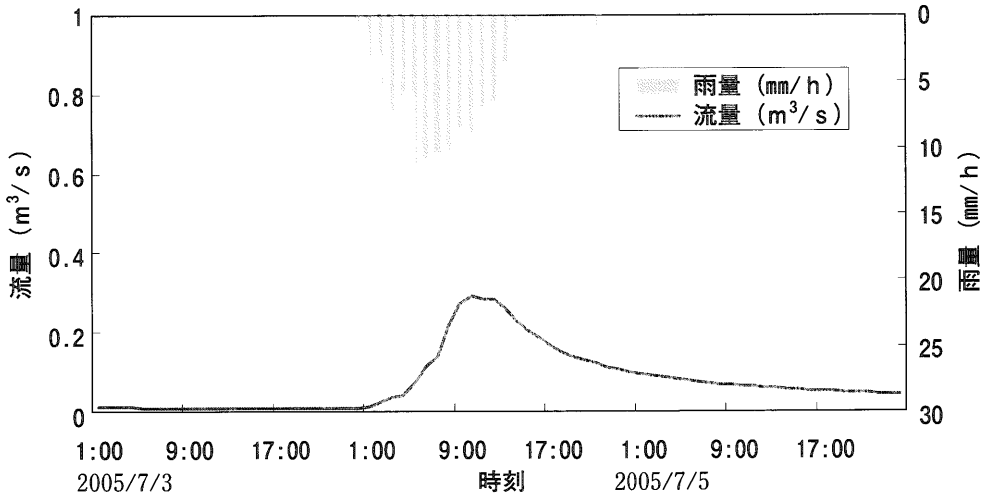
観測日(年/月/日)	年最大24時間雨量（再現期間） (mm)	ピーク流量（再現期間） (m^3/s)
2004/10/20～21	142.5（5年）	0.61（7年）
2005/07/3～4	112.5（2年以下）	0.17（2年）
2006/07/18～19	194.5（10年）	0.89（15年）

表－5　各区間における2006年7月洪水時のピーク流量

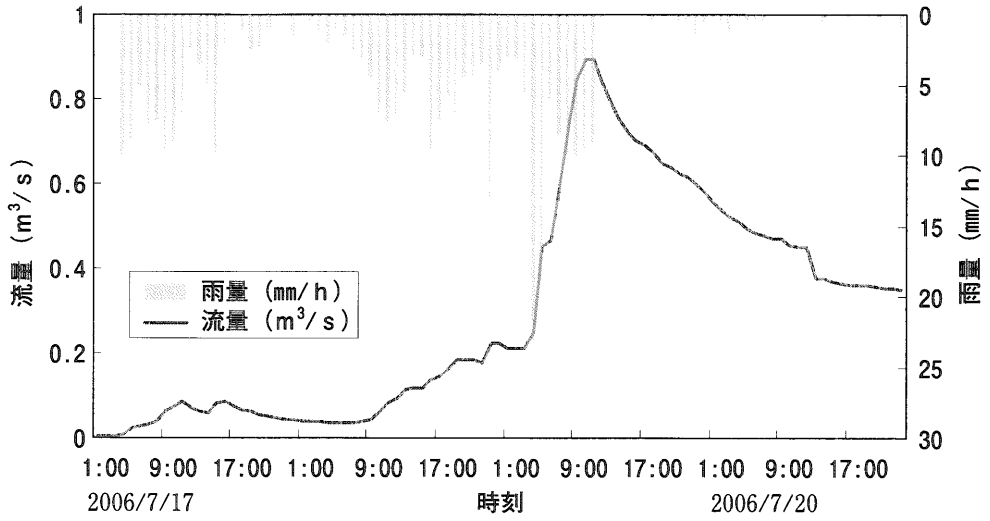
測　線	流域面積 (km^2)	勾配（i） (%)	ピーク流量 (m^3/s)
下流区間	0.378	7.5	0.89
合流点下流区間	0.283	9.5	0.67
合流点上流区間	0.176	12.9	0.41
上流区間	0.160	13.9	0.38



図－5　2004年10月洪水の降雨と流量



図－6　2005年7月洪水の降雨と流量



図－7　2006年7月洪水の降雨と流量

5.2 洪水による階段状河床地形の変化

5.2.1 下流区間

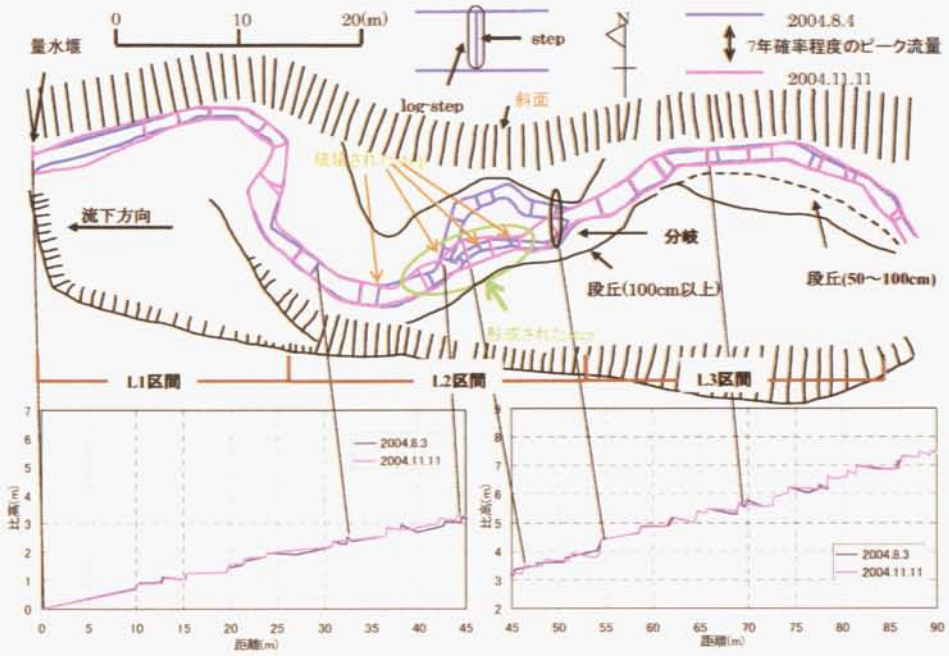
2004年8月4日と2004年11月11日の間に下流区間の一部において河床地形が変化したことが確認された。この変化は2004年10月洪水（7年確率ピーク流量（0.61m^3/s））によると考えられたので，この2時期の河床地形を比較することにより，2004年10月洪水による河床地形変化を検討する。図－8に2時期の流路の平面形および河床縦断形を示す。図－8には，stepの位置と斜面，渓岸の位置も示してある。また，下流区間を3つの区間に分け，その下流部をL1区間，中流部をL2区間，上流部をL3区間と呼ぶことにする。2時期で河床位に変化は生じなかったが，流路が変化しているので，縦断方向に距離の差が生じた。そこで，平面的な位置や比高が変化していないstepを基準にして距離を調整し，流路変化に伴う位置のずれを修正した。この修正は，2004年8月4日に測定された流路に対して行われた。図－8の平面図を見ると，中流部L2区間において，2004年8月に2本に分岐していた流路が洪水後の2004年11月には左岸側の流路だけになった。分岐していた右岸側の流路には土砂が堆積し，流路は埋没していた（写真－7，写真－8）。この場所は，谷底の平坦面の拡幅部となっていて，土砂の堆積や流路の側方移動が起こりやすい条件となっているため，このような変化が起こったと考えられる。

2時期のstepの位置と縦断形を比較し，2004年10月洪水によるstepの変化を調べると，中流部L2区間では，4個のstepが破壊され，洪水後に新たに5個のstepが形成されたことが確認された。一方，下流部L1区間ではstepの位置の変化がほとんどなく，上流部L3区間では，洪水前に14個あったstepの内2個が土砂で埋っただけであった。このように，2004年10月洪水では，中流部L2区間でしかstepの破壊，形成による位置の変化は見られなかった。また，河床の縦断形も同様に，L2区間以外でほとんど変化が見られなかった。

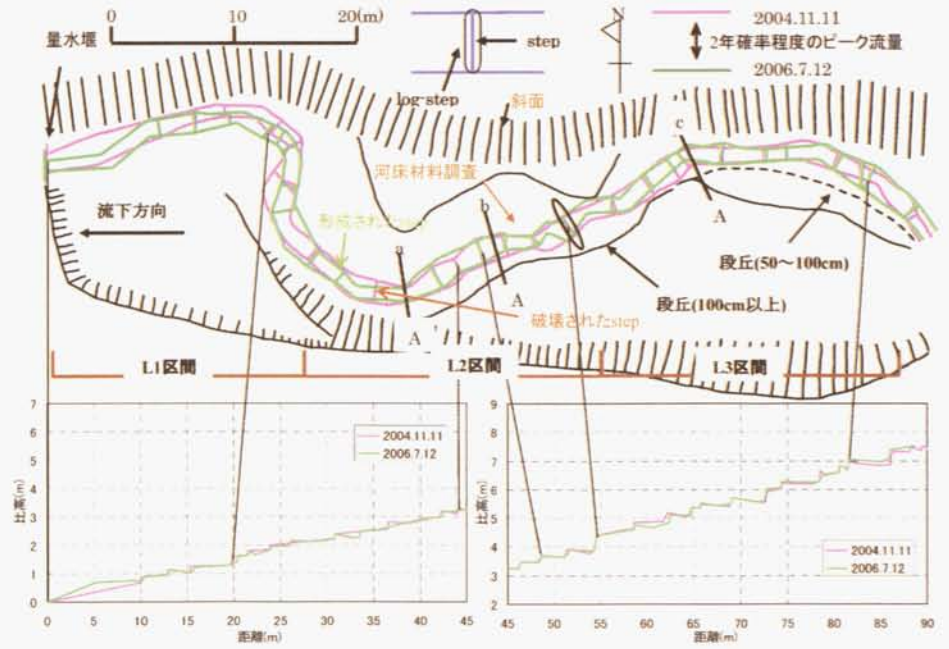
2004年11月11日と2006年７月13日の２時期の河床地形を比較し，この間に発生した2005年７月洪水（２年確率ピーク流量（0.17m^3/s））の河床地形に及ぼした影響を検討する。図－９に２時期の流路の平面形および河床縦断形を示す。図－９には2006年７月13日の調査時の横断測量の測線，河床材料調査の場所も示している。その測線の横断図を図－10に示す。また，２時期で流路が変化しているので，図－８と同様に図－９の流路縦断の修正を行なった。この修正は，2004年11月11日に測定された流路に対して行なわれた。図－９は，2004年11月11日と2006年７月13日の流路と河床位の大部分にほとんど変化がなかったことを示している。stepについてみると，１つが土砂で埋り，１つが破壊され，１つが新たに形成されていた。このことから，下流区間では，ピーク流量の再現期間が２年の洪水では河床地形にほとんど影響が及ばないと推定される。

2006年７月洪水（15年確率ピーク流量（0.89m^3/s））により，下流区間で渓床地形の変化がみられたので，2006年７月13日と2006年９月28日の２時期の河床地形を比較することにより，2006年10月洪水による河床地形変化を検討する。図－11にその２時期の流路の平面形および河床縦断形を示す。２時期で流路が変化しているので，図－15と同様に流路縦断の修正を行なった。この修正は，2006年９月28日に測定された流路に対して行なわれた。図－18は，中流部Ｌ２区間において，2004年11月以降左岸側だけになっていた流路は，2006年７月洪水により2004年８月４日と同じ２本の流路に戻ったことを示している（写真－９，写真－10）。stepの変化についてみると，下流部Ｌ１区間と中流部Ｌ２区間では，合わせて15個のstepが洪水前に存在していたが，そのうち９個が破壊され，新たに10個のstepが形成されたことが確認された。しかし，上流部Ｌ３区間では，洪水前に存在していた11個のstepのうち，破壊されたのは１個だけであり，残り10個のstepは，その位置をほとんど変えていなかった。また，Ｌ３区間では，破壊されなかったstepとstepの間に新たに２個のstepが形成された。すなわち，2006年７月洪水によって，下流部Ｌ１区間と中流部Ｌ２区間では多数のstepが破壊されたのに対し，上流部Ｌ３区間ではstepの破壊はほとんど起こらなかった。

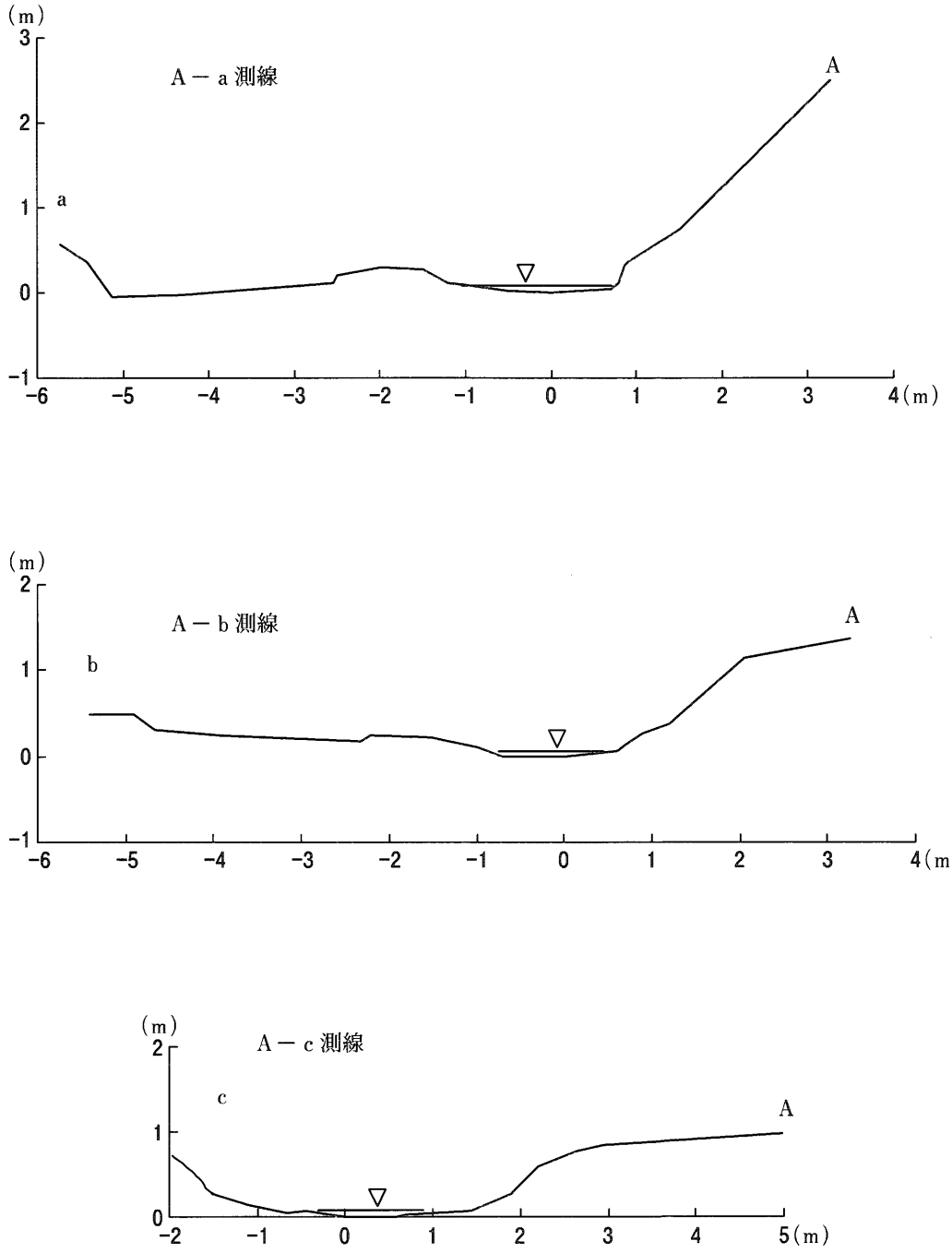
Ｌ１区間とＬ２区間はＬ３区間に比べて谷底の平坦面が広くなっており，これが，Ｌ１区間およびＬ２区間で土砂の堆積と流路の側方移動を起こしやすい一つの条件となり，その結果，stepの破壊が起こりやすくなるということが考えられる。



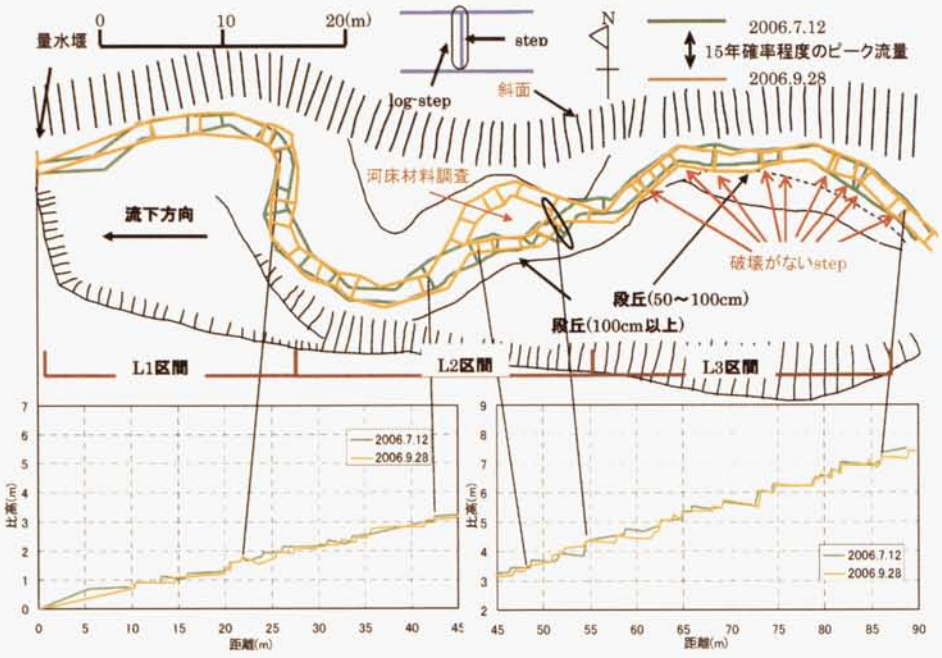
図－8　下流区間の2004年10月洪水前（2004年８月４日調査）と2004年10月洪水後（2004年11月11日調査）の流路の平面形および河床縦断形



図－9　下流区間の2005年７月洪水前（2004年11月11日調査）と2005年７月洪水後（2006年７月12日調査）の流路の平面形および河床縦断形



図－10　下流区間における各測線の横断面形（2006年７月13日測定）



図－11　下流区間の2006年７月洪水前（2006年７月12日調査）と洪水後（2006年９月28日調査）の流路の平面形および河床縦断形



写真－７　2004年８月４日の下流区間（L２区間）の分岐流路



写真－８　2004年11月11日の下流区間（L２区間）の分岐流路



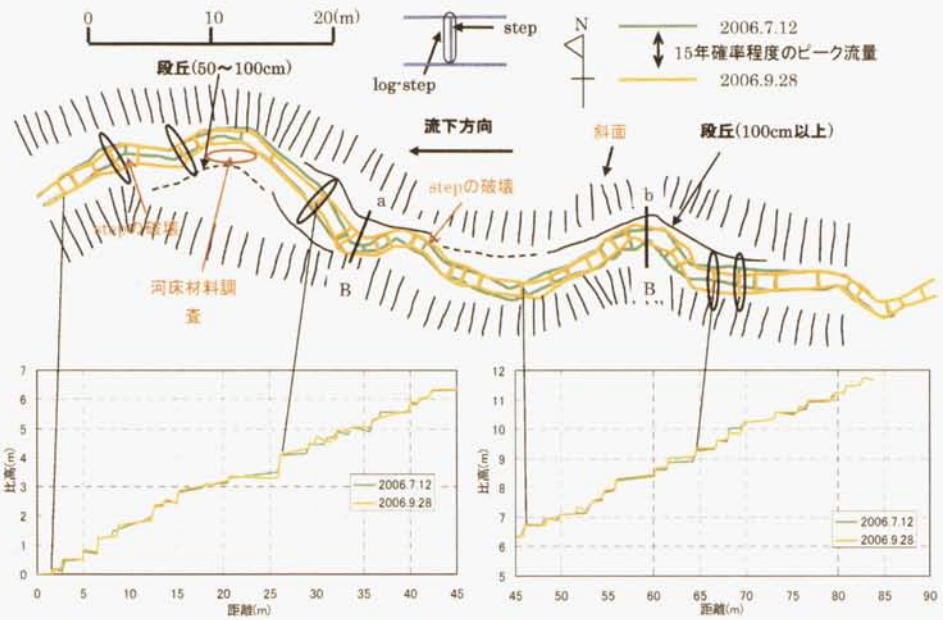
写真－9　2006年7月13日の下流区間
（L 2区間）の分岐流路



写真－10　2006年9月28日の下流区間
（L 2区間）の分岐流路

5.2.2　上流区間

2006年7月洪水（15年確率ピーク流量（0.38m^3/s））により，上流区間の河床地形の変化が確認されたので，洪水前後の2006年7月13日と2006年9月28日の2時期の河床地形を比較することにより，この洪水の河床地形変化に及ぼす影響を検討する。図－12にこの2時期の流路の平面形および河床縦断形を示す。さらに，図－12には2006年7月13日調査時の横断測量の測線，河床材料の調査場所も示している。2時期で流路が変化しているので，図－8と同様に図－12の流路縦断を修正した。この修正は，2006年9月28日の流路に対して行なわれた。図－12は，上流区間では緩勾配の下流区間に比べて，2006年7月洪水によって流路の側方移動と河床縦断形がほとんど変化しなかったことを示している。stepについては，洪水前に存在していた36個のstepのうち破壊されたものは2個だけであり，そのほか2個が土砂で埋まった。洪水後に新たに形成されたstepは3個であった。

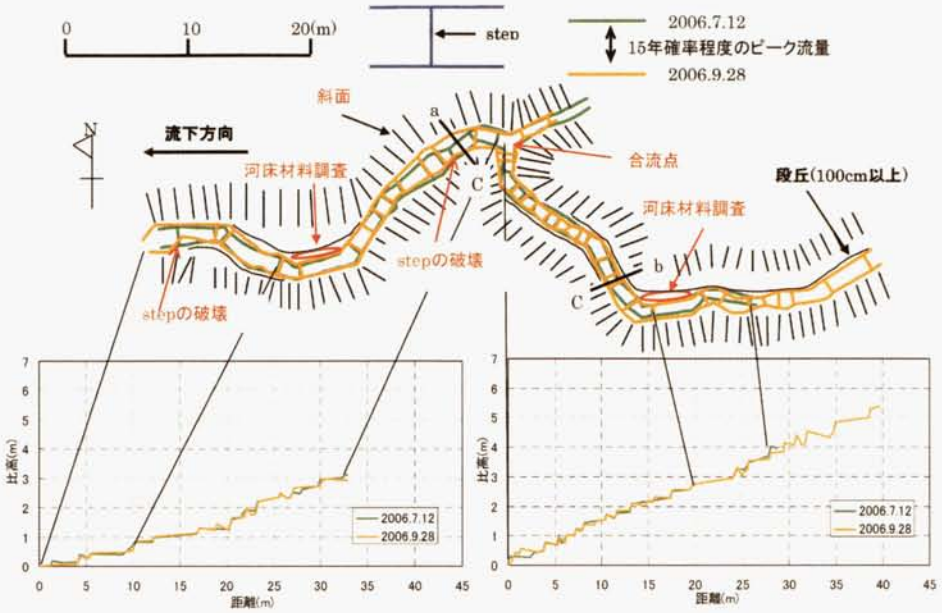


図－12　上流区間の2006年７月洪水前（2006年７月12日調査）と洪水後（2006年９月28日調査）の流路の平面形および河床縦断形

5.2.3　合流点下流区間，合流点上流区間

2006年７月洪水（15年確率ピーク流量（0.38m^3/s））による河床地形の変化を洪水前後の2006年７月13日と2006年９月28日の２時期の河床地形を比較し，検討する。図－13にこの２時期の流路の平面形および河床縦断形を示す。さらに，図－13には2006年７月13日調査時の横断測量の測線，河床材料の調査場所も示している。２時期で流路が変化しているので，図－13では流路縦断の距離を修正してある。この修正は，2006年９月28日に測定された流路について行なった。図－13は，合流点下流区間および合流点上流区間のいずれにおいても流路の側方移動と河床縦断形の変化がほとんどなかったことを示している。stepについては，合流点下流区間では，洪水前に存在していた13個のstepのうち，破壊されたものは２個であり，洪水後に新たに形成されたものは１個であった。これら以外は，位置的にも，縦断的にもほとんど変化せず，stepの破壊・形成が起こらなかったと考えられる。合流点上流区間では，洪水前に存在していた14個のstepのうち，土砂で埋まったものが１個，新たに形成されたものが４個であった。

合流点下流区間，合流点上流区間では流路の側方移動は見られなかった。これは，谷幅が狭いために流路の移動が制限されたためであると考えられる（図－13，写真－４）。下流区間のように流路の側方移動が容易な区間でstepの破壊が生じており，流路の側方移動がstepの破壊に影響していると考えられる。



図－13　合流点下流区間，合流点上流区間の2006年７月洪水前（2006年７月12日調査）と洪水後（2006年９月28日調査）の流路の平面形および河床縦断形

5.3　洪水による河床材料変化

5.3.1　下流区間

下流区間におけるstep構成礫とstep以外の河床材料について，それらの粒度分布を調べた。調査は，2004年８月４日，2004年11月11日，2006年７月13日および2006年９月28日の４時期に行なった。ただし，step以外の河床材料調査ついては，2006年７月洪水以前の2006年７月13日の１時期であった。

2004年10月洪水によるstep構成礫の変化をみるため，下流区間のＬ１区間，Ｌ２区間，Ｌ３区間における2004年８月４日調査時のstep構成礫の粒度分布（洪水前）を図－14に，2004年11月11日調査時の粒度分布（洪水後）を図－15に示す。また，それらのstep構成礫の粒径範囲，平均粒径，個々のstepの構成礫の最大粒径を平均したものを表－６，表－７に示す。2004年10月洪水前，洪水後のいずれにおいてもＬ１区間とＬ２区間のstep構成礫の平均粒径は20cm，最大礫の平均粒径は30cmであった（表－６，表－７）。このように，Ｌ２区間ではこの洪水によってstepの破壊と形成がみられたにもかかわらず，step構成礫の大きさに変化はなかった。また，Ｌ３区間でのこの洪水前後のstep構成礫の平均粒径および最大礫の平均粒径は，それぞれ22cm，33cmであった（表－６，表－７）。Ｌ３区間ではこの洪水でstepの破壊･形成がほとんど起こらなかったため，step構成礫の大きさに変化がみられなかったものと思われる。Ｌ３区間とそれ以外の区間を比べると，洪水前後とも，Ｌ３区間のstepが大きな礫で構成されていることがわかる。step構成礫の粒度分布についてみると，Ｌ２区間で，若干の変化がみられた（図－14，図－15）。

2005年７月洪水によるstep構成礫の変化をみるため，この洪水以前の2004年11月11日調査時のstep構成礫の粒度分布（図－15）および粒径範囲・平均粒径・各step最大礫の平均粒径（表－７）と2005年７月洪水後の2006年７月13日調査時のstep構成礫のそれら要素とを比較する。Ｌ１区間，Ｌ２区間，Ｌ３区間における2006年７月13日調査時のstep構成礫の粒度分布を図－16に，step構成礫の粒径範囲，平均粒径，個々のstepの構成礫の最大粒径を平均したものを表－８に示す。2005年７月洪水は，これら区間の河床地形にほとんど影響を与えなかったため，これら区間のstep構成礫の平均粒径，最大礫の平均粒径に変化はみられない（表－７，表－８）。しかし，Ｌ２区間については，2005年７月洪水後にstep構成礫の粒径範囲が広がっている（表－７，表－８）。また，粒度分布についてみると，Ｌ１区間およびＬ３区間ではほとんど変化はみられないが，Ｌ２区間では若干の変化がみられる（図－15，図－16）。これは，Ｌ２区間のstep構成礫の粒径範囲の広がりと対応した結果と考えられ，stepの破壊，形成は起こらなかったが，Ｌ２区間ではこの期間にstep構成礫に一部移動があったことを示している。

2006年７月洪水によるstep構成礫の変化をみるため，既に示したこの洪水前の2006年７月13日時点のstep構成礫に関する調査結果（図－16，表－８）と洪水後の2006年９月28日時点の調査結果を比較する。Ｌ１区間，Ｌ２区間，Ｌ３区間における2006年９月28日調査時のstep構成礫の粒度分布を図－17に，step構成礫の粒径範囲，平均粒径，個々のstepの構成礫の最大粒径を平均したものを表－９に示す。2006年７月洪水により，Ｌ１区間およびＬ２区間では，数多くのstepの破壊，形成が引き起こされたが，step構成礫の粒径範囲，平均粒径，最大礫の平均粒径には変化がみられなかった（表－８，表－９）。しかし，Ｌ２区間のstep礫の粒度分布はかなり変化しており（図－16，図－17），この区間のstepの破壊，形成の影響が粒度分布に表れているとみられる。また，stepの破壊，形成がごく僅かしか起こらなかったＬ３区間では，step構成礫の粒径範囲，平均粒径，最大礫の平均粒径に変化はみられず，粒径分布についても，ほとんど変化はみられなかった（表－８，表－９，図－16，図－17）。

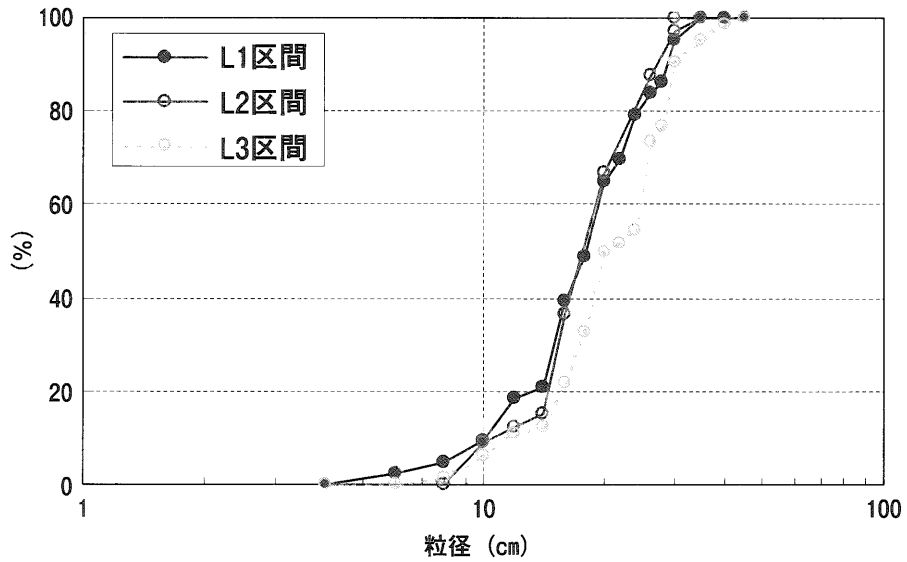
以上のように，Ｌ１区間，Ｌ２区間，Ｌ３区間のstep構成礫の平均粒径および最大礫の平均粒径は，2004年から2006年にかけて３回の洪水を経験したにもかかわらず変化せず，Ｌ１区間およびＬ２区間ではそれぞれ20cm，30cm，Ｌ３区間ではそれぞれ22cm，33cmであった。たびたびstepの破壊，形成を経験したＬ２区間でもstep構成礫の平均粒径および最大礫の平均粒径は変化していない。しかし，粒径分布は変化しており，これらの関係はstepの破壊，形成を考えるうえで興味深い。

下流区間全体（Ｌ１区間，Ｌ２区間，Ｌ３区間）のstep以外の河床材料の粒径調査を，2006年７月13日に行った。図－18は，その結果を示したもので，step構成礫の粒度分布も示してある。また，表－10に同時期に測定したstep以外の河床材料の粒径範囲と平均粒径をstep構成礫の粒径範囲，平均粒径，stepの構成最大礫の平均粒径とともに示す。なお，表中には，後述の上流区間，合流点下流区間，合流点上流区間についても示してある。図－18，表－10よりstep構成礫の平均粒径20cmはstep以外の河床材料の90%程度の粒径に相当すること，step以外の河床材料は0.2cmから30cmの砂礫で構成され，その平均粒径は６cmであることがわかる。また，stepは６cmから

45cmの礫で構成され，その平均は20cmであること，それぞれのstepの構成礫の中の最大粒径の平均は31cmであることがわかる。

表－6　下流区間のL1・L2・L3区間における2004年10月洪水前（2004年8月4日調査）のstep構成礫

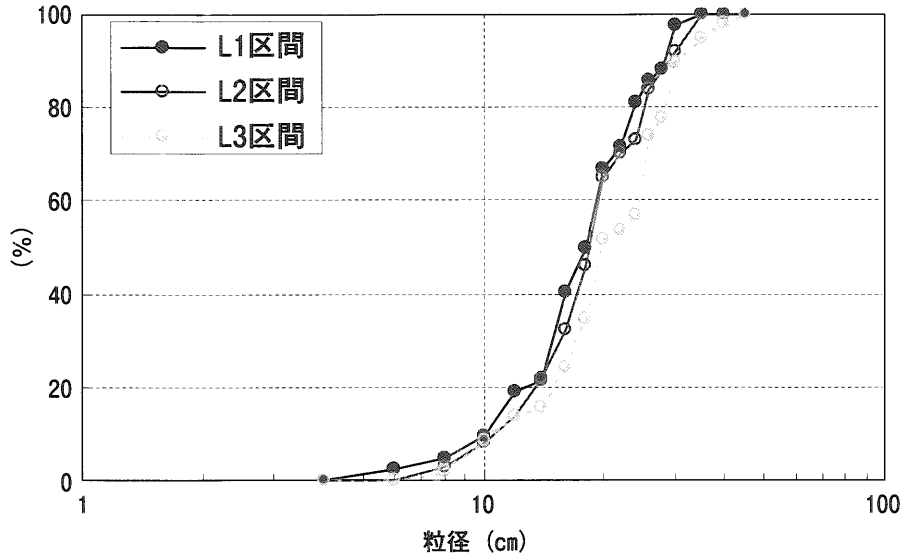
	L1区間	L2区間	L3区間
流路長（m）	31.8	21.8	34.8
平均勾配（%）	7.5	8.3	9.0
step構成礫の粒径の範囲（cm）	6～35	8～35	8～45
step構成礫の平均粒径（cm）	20	20	22
step構成最大礫の平均粒径（cm）	30	30	33



図－14　下流区間のL1・L2・L3区間における2004年8月4日調査時のstep構成礫の粒度分布

表－7　下流区間のL1・L2・L3区間における2004年10月洪水後および2005年7月洪水前（2004年11月11日調査）のstep構成礫

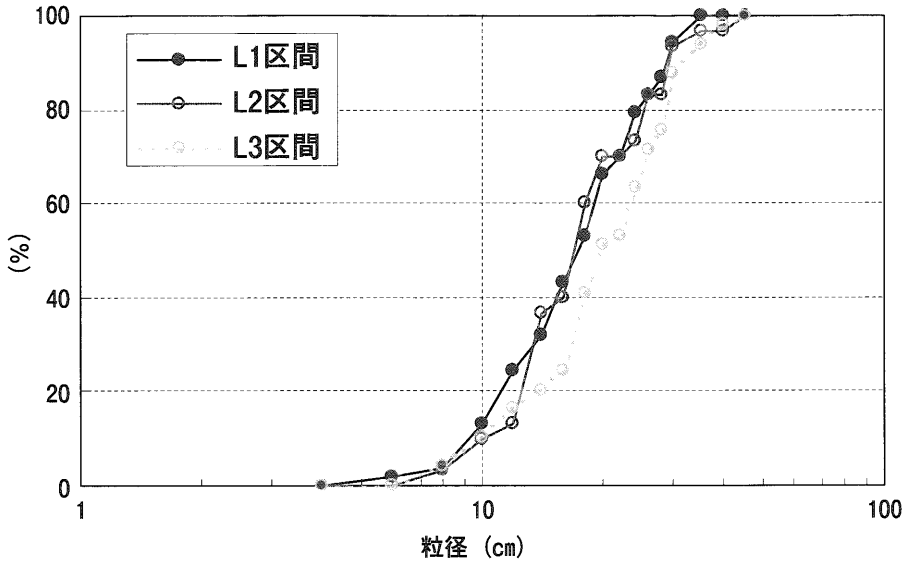
	L1区間	L2区間	L3区間
流路長（m）	31.8	23.2	34.8
平均勾配（%）	7.5	8.3	9.0
step構成礫の粒径の範囲（cm）	6～35	8～35	8～45
step構成礫の平均粒径（cm）	20	20	22
step構成最大礫の平均粒径（cm）	30	30	33



図－15　下流区間のＬ１・Ｌ２・Ｌ３区間における2004年11月11日調査時のstep構成礫の粒度分布

表－８　下流区間のＬ１・Ｌ２・Ｌ３区間における2005年７月洪水後および2006年７月洪水前（2006年７月13日調査）のstep構成礫

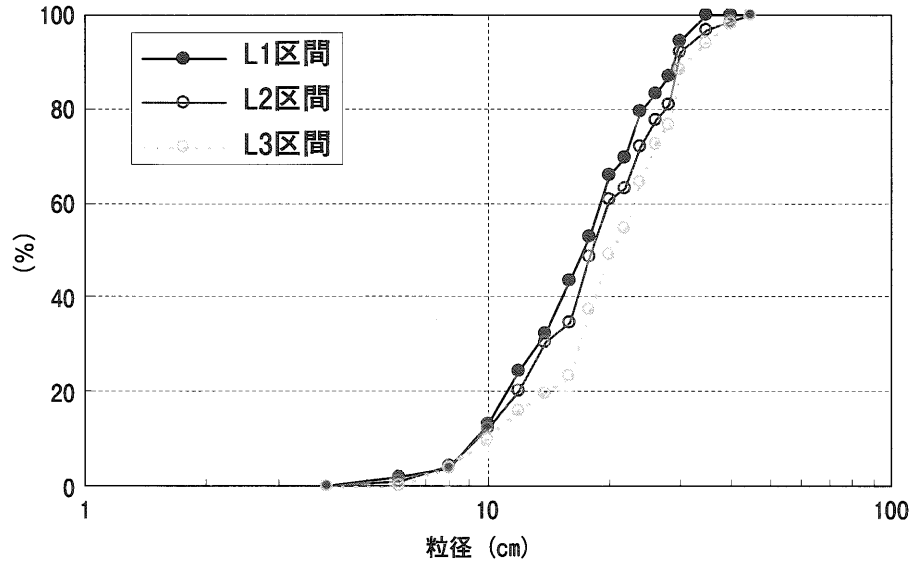
	Ｌ１区間	Ｌ２区間	Ｌ３区間
流路長（m）	31.1	21.9	34.1
平均勾配（%）	7.5	8.3	9.0
step構成礫の粒径の範囲（cm）	6～35	8～45	8～45
step構成礫の平均粒径（cm）	20	20	22
step構成最大礫の平均粒径（cm）	30	30	33



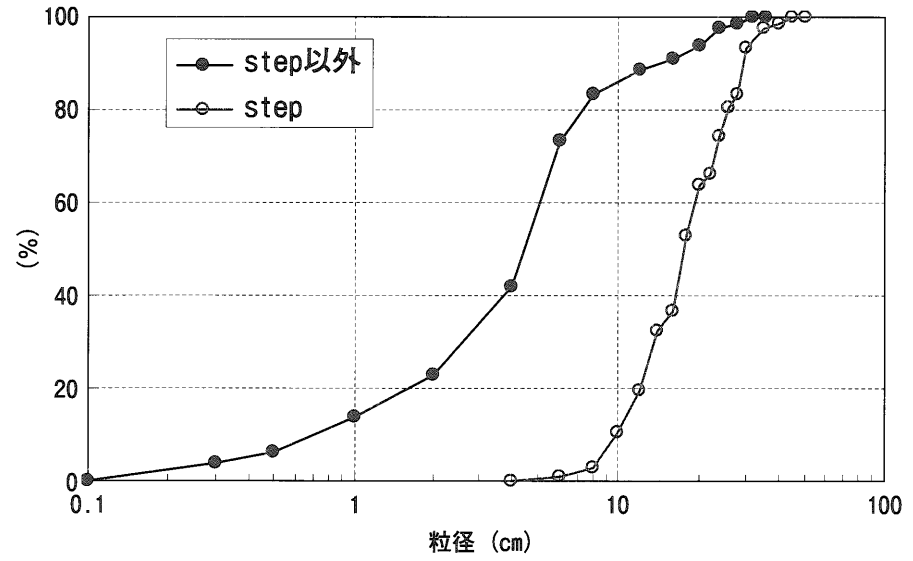
図－16　下流区間のＬ１・Ｌ２・Ｌ３区間における2006年７月13日調査時のstep構成礫の粒度分布

表－９　下流区間のＬ１・Ｌ２・Ｌ３区間における2006年７月洪水後（2006年９月28日調査）のstep構成礫

	Ｌ１区間	Ｌ２区間	Ｌ３区間
流路長（m）	32.2	22.1	35.2
平均勾配（%）	7.5	8.3	9.0
step構成礫の粒径の範囲（cm）	6～35	8～45	8～45
step構成礫の平均粒径（cm）	20	20	22
step構成最大礫の平均粒径（cm）	30	30	33



図－17　下流区間のＬ１・Ｌ２・Ｌ３区間における2006年９月28日調査時のstep構成礫の粒度分布



図－18　下流区間における2006年７月13日調査時の河床材料の粒度分布

表－10　各区間の2006年７月洪水前（2006年７月13日調査）の河床材料

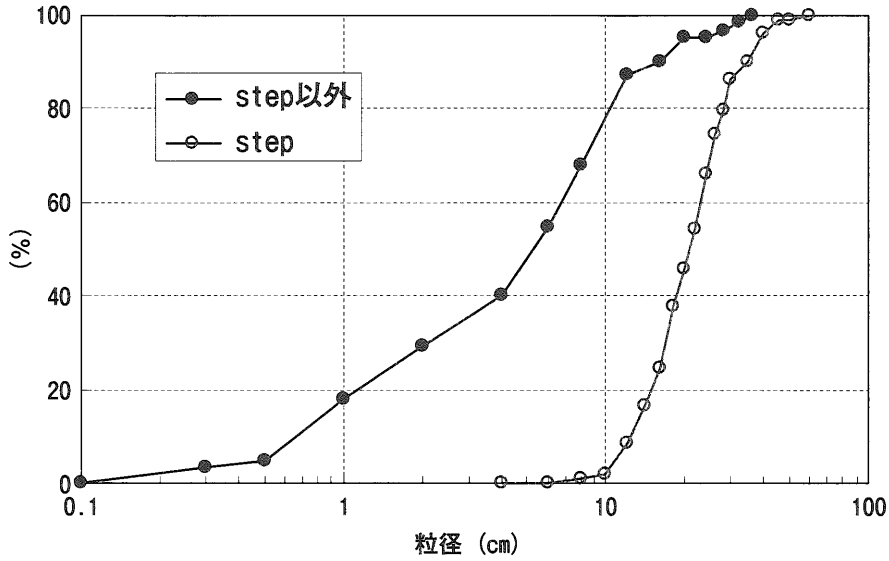
	下流区間	上流区間	合流点下流区間	合流点上流区間
step以外の粒径の範囲（cm）	0.2～30	0.2～35	0.2～33	0.2～35
step以外の平均粒径（cm）	6	7	6	7
step構成礫の粒径の範囲（cm）	6～45	7～60	8～50	8～50
step構成礫の平均粒径（cm）	20	23	21	22
step構成最大礫の平均粒径（cm）	31	35	33	35

5.3.2　上流区間

上流区間における2006年７月洪水前の2006年７月13日調査時のstep以外の河床材料の粒度分布とstep構成礫の粒度分布とを図－19に示す。表－10に2006年７月洪水前の上流区間のstep以外の河床材料とstep構成礫の粒径について示す。図－19，表－10はstep構成礫の平均粒径23cmはstep以外の河床材料の95%程度の粒径に相当すること，step以外の河床材料は0.2cmから35cmの砂礫で構成され，その平均粒径は７cmであることを示している。また，step構成礫は7cmから60cmの範囲にあり，その平均は23cmであること，それぞれのstepの構成礫の中の最大礫の平均は35cmであることも示している。

上流区間における2006年７月洪水後の2006年９月28日調査時のstep構成礫の粒度分布を図－20に示す。この図には同時期に測定した合流点下流・上流区間のstep構成礫の粒度分布も示している。また，表－11には2006年9月28日調査時の上流区間のstep構成礫の粒径を，同時期に測定した合流点下流区間・上流区間の粒径とともに示している。図－20，表－11により上流区間のstep構成礫は６cmから60cmの砂礫で構成され，その平均は22cmであること，それぞれのstepの構成礫の中の最大礫の平均は34cm程度であることがわかる。2006年７月洪水前後のstep構成礫の平均粒径，最大礫の平均粒径を比べると，それらは洪水前より１cm程度小さくなっているが，この値から直ちに，step構成礫に変化があったと判断することはできない。

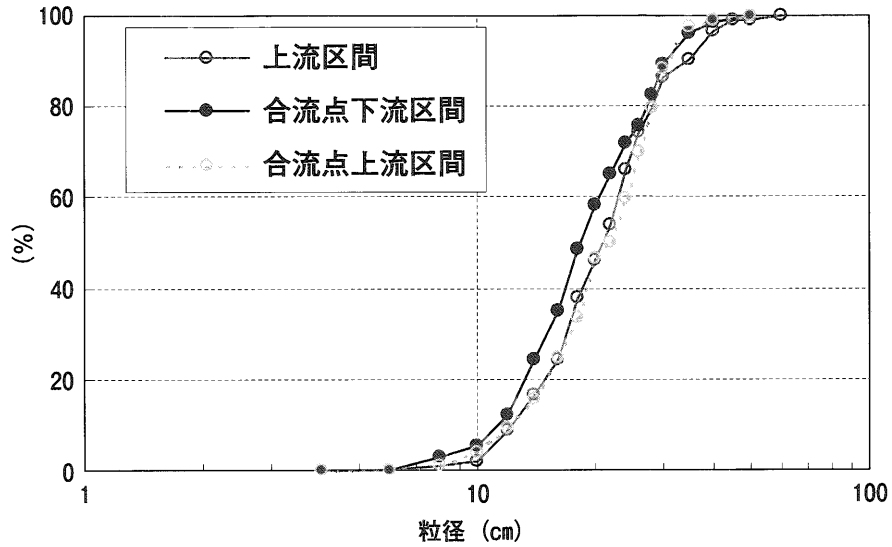
2006年7月洪水前の下流区間と上流区間におけるstep構成礫の粒径範囲，平均粒径および最大礫の平均粒径を比べると，いずれも明らかに上流区間で大きい（表－10）。また，step以外の河床材料の粒径範囲，平均粒径は上流区間で若干大きいが，step構成礫のような明らかな差はみられない（表－10）。



図－19　上流区間における2006年７月13日調査時の河床材料の粒度分布

表－11　上流区間及び合流点下流区間，合流点上流区間における2006年7月洪水後（2006年９月28日調査）のstep構成礫

	上流区間	合流点下流区間	合流点上流区間
流 路 長（m）	83.8	32.9	34.4
平均勾配（%）	13.9	9.5	12.9
step構成礫の粒径の範囲（cm）	6～60	8～50	7～50
step構成礫の平均粒径（cm）	22	21	22
step構成最大礫の平均粒径（cm）	34	33	34



図－20　上流区間及び合流点下流区間，合流点上流区間における2006年９月28日調査時のstep構成礫の粒度分布

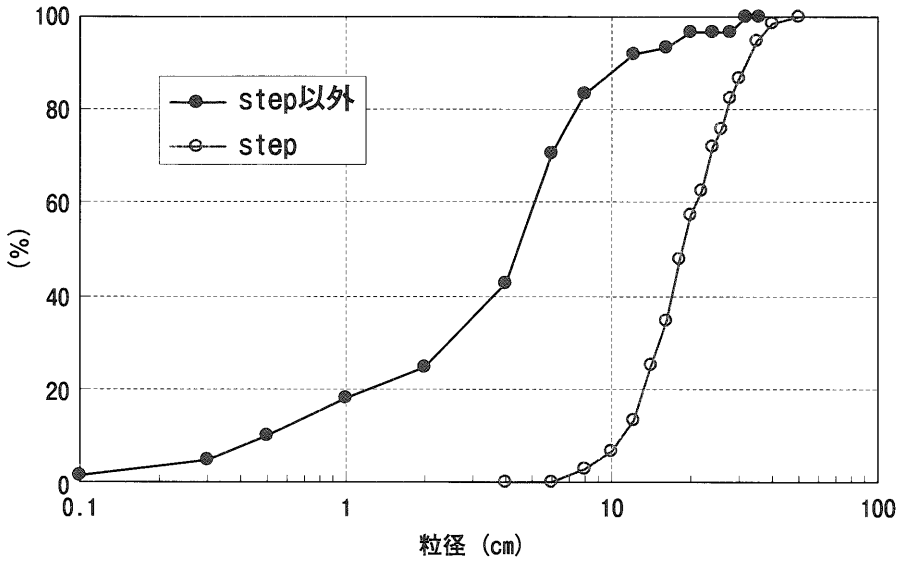
5.3.3　合流点下流区間，合流点上流区間

合流点下流区間における2006年７月洪水前の2006年７月13日調査時のstep以外の河床材料の粒度分布とstep構成礫の粒度分布とを図－21に示す。図－21および前述の表－10より合流点下流区間のstep構成礫の平均粒径21cmは，step以外の河床材料の90%程度の粒径に相当すること，step以外の河床材料は0.2cmから33cmの砂礫で構成され，その平均粒径は６cmであること，stepの構成礫は８cmから50cmの範囲にあり，最大礫の平均は33cmであることがわかる。2006年９月28日の2006年7月洪水後の調査では，stepは8cmから50cmの礫から構成され，平均粒径が21cmであること，また，最大礫の平均は33cmであることがわかった（表－11)。以上のように，合流点下流区間では，2006年７月洪水によって，step構成礫の平均粒径，最大礫の平均粒径が変化しなかったことを示している（表－10，表－11)。

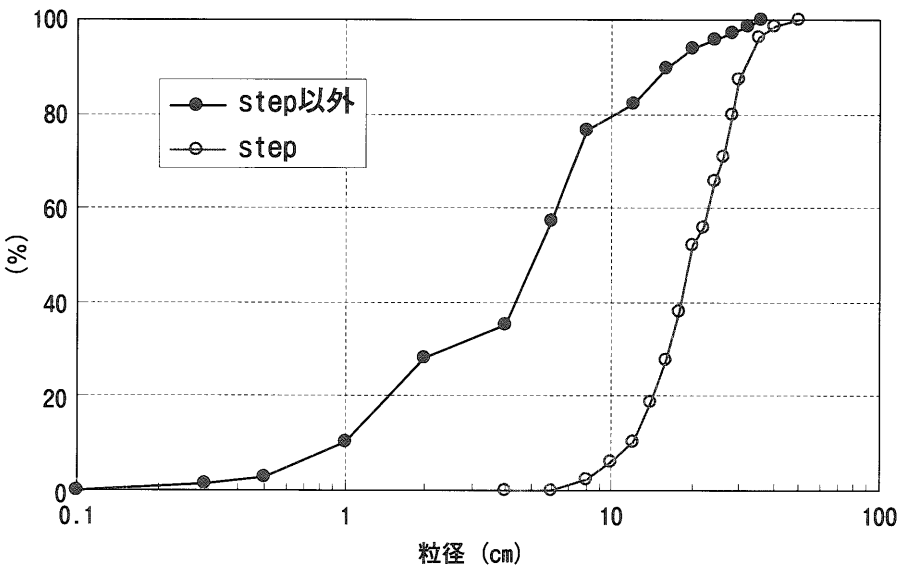
合流点上流区間における2006年７月洪水前の河床材料の粒度分布とstep構成礫の粒度分布とを図－22に示す。図－22および前述の表－10よりstep構成礫の平均粒径22cmは，step以外の河床材料の95%程度の粒径に相当すること，step以外の河床材料は0.2cmから35cmの砂礫で構成され，その平均粒径は７cmであること，stepの構成礫は８cmから50cmの範囲にあり，最大礫の平均は35cmであることがわかる。2006年７月洪水前後のstep構成礫の粒径範囲，平均粒径，最大礫の平均粒径および粒度分布を比べると，それらが洪水前後でほとんど変化していないことがわかる(表－10，表－11，図－20，図－22)。

合流点下流区間と合流点上流区間でstep構成礫の粒径範囲，平均粒径，最大礫の平均粒径を比べると，2006年７月洪水前あるいは洪水後のいずれにおいても，それらは合流点上流区間で若干大きい値をとるが，これから直ちに合流点上流区間のstep構成礫の粒径が大きいと結論するこ

とはできない（表－10，表－11）。



図－21　合流点下流区間における2006年７月13日調査時の河床材料の粒度分布



図－22　合流点上流区間における2006年７月13日調査時の河床材料の粒度分布

5.4 階段状河床の形状特性

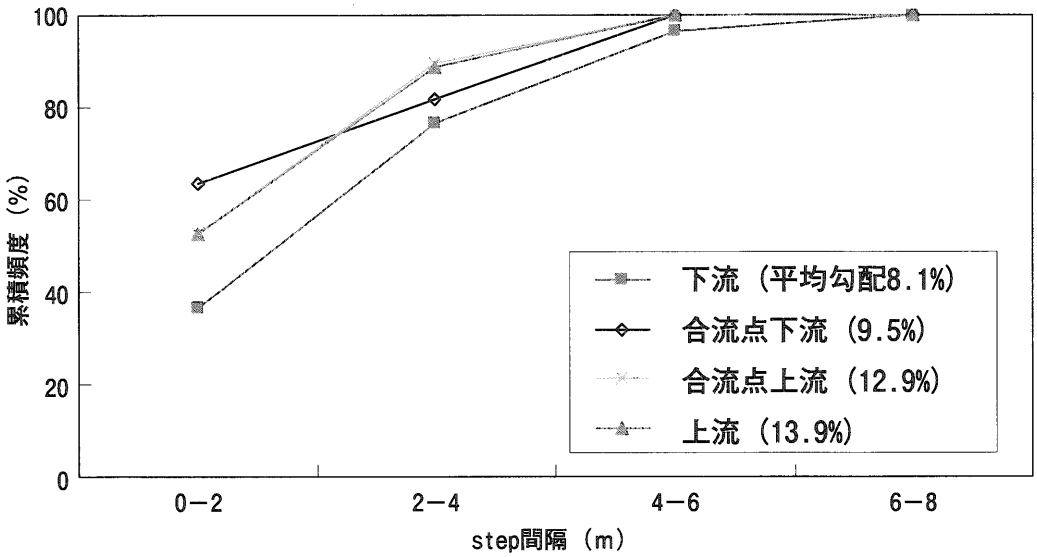
階段状河床の形状特性を検討するため，2006年７月洪水後の2006年９月28日調査時点のstep間隔とstep高を調査全区間（下流区間，合流点下流区間，合流点上流区間，上流区間）にわたって整理した。step間隔（図－３）の頻度分布を図－23に，step高（図－３）の頻度分布を図－24に示す。また，表－12にそれぞれの区間の平均step間隔および平均step高を示す。

下流区間と上流区間のstep間隔の平均値を比較すると，勾配の緩い下流区間で2.80ｍ，急な上流区間で2.36mであり（表－12），勾配が急になるほどstep間隔が短くなるという従来から述べられている関係（Grant, 1988, 秋山ら, 2001）がみられる。また，step間隔の頻度分布も下流区間と上流区間で明らかな差がみられ（図－24），勾配がstep間隔の平均値だけでなく分布にも影響していることがわかる。しかし，合流点下流区間では上述の勾配とstep間隔との関係は不明瞭である（表－12，図－24）。これには，支流合流による流域面積の急拡に伴う合流点下流区間の流量の増大が関与している可能性が考えられる。

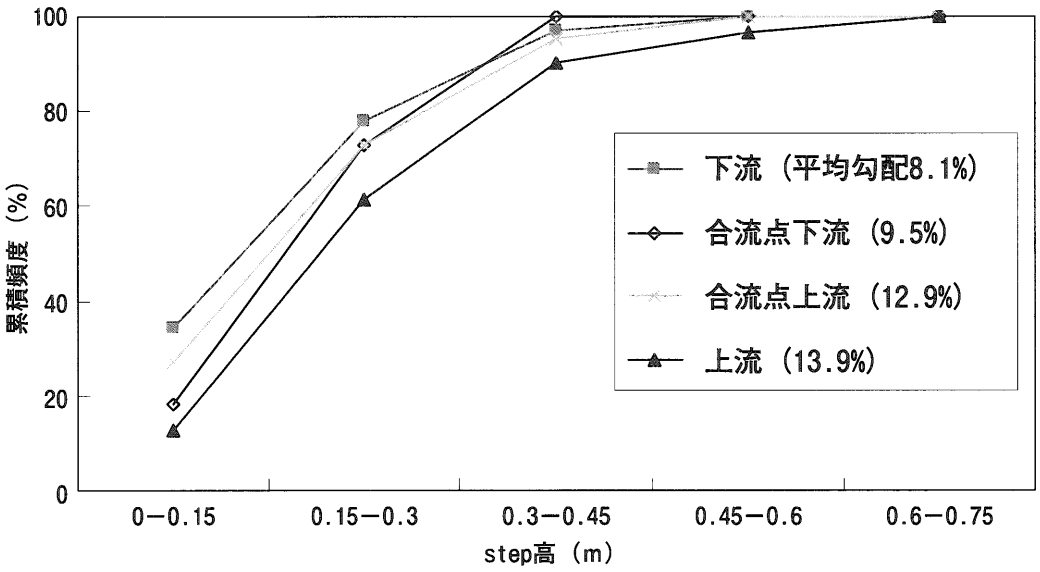
step高に着目すると，その平均値は，下流区間，合流点下流区間，合流点上流区間，上流区間でそれぞれ21.3cm，23.9cm，23.9cm，24.7cm であり（表－12），それぞれの区間のstep構成礫の平均値20cm，21cm，22cm，22cmと比べると１cmから３cm程度大きい値をとる。また，それぞれの区間の平均step高の1.4倍程度が，step構成最大礫の平均粒径の大きさに一致する。これから考えると，調査地域のstep高がstep構成礫の大きさによって規定されている可能性が高い。

表－12　各区間における2006年７月洪水後（2006年９月28日調査）の階段状河床地形の構造

	下流区間	上流区間	合流点下流区間	合流点上流区間
流路長（m）	91.2	83.8	32.9	34.4
平均勾配（%）	8.1	13.9	9.5	12.9
平均step高（cm）	21.3	23.9	23.9	24.7
平均step間隔（m）	2.80	2.36	2.17	2.24



図－23　step間隔の累積頻度分布（2006年９月28日調査）



図－24　step高の累積頻度分布（2006年9月28日調査）

5.5 下流区間における階段状河床地形の破壊，形成と水理条件

下流区間，特に中流部のL2区間では，2004年10月洪水，2006年7月洪水によって，多数のstepが破壊されるとともに新たなstepが形成された。一方，上流部のL3区間ではこれら洪水によるstepの破壊はほとんどみられなかった。また，下流部のL1区間では2004年10月洪水ではstepの破壊はみられなかったが，2006年10月洪水では，stepの破壊がみられた。そこで，L1区間，L2区間およびL3区間でのこれらの洪水時による水理量を求め，水理量と土砂移動およびstepの破壊，形成について検討した。stepの破壊，形成は混合砂礫の射流での流送という条件のもとで起こる。したがって，平均粒径の無次元掃流力τ_{*m}，平均粒径の無次元限界掃流力τ_{*cm}，最大粒径の無次元限界掃流力τ_{*cmax}が重要な水理量となる。τ_{*m}は(3)式，τ_{*cmax}は(4)式のEgiazaroff式（Egiazaroff, 1965）から求めることができる。また，τ_{*cm}はstepの破壊，形成が起こるような完全粗面乱流の流れでは一定値をとる。ここでは，その一定値を0.05とする。

$$\tau_{*m} = u_*^2 / sgd_m \qquad (3)式$$

$$\tau_{*cmax} = \left(\ln 19 \Big/ \ln\left(19\frac{d_{max}}{d_m}\right)\right)^2 \cdot \tau_{*cm} \qquad (4)式$$

ここで，s：次式であらわされる砂礫の水中比重，$s = \rho_s/(\rho - 1)$，
ρ_s：砂礫の密度，ρ：水の密度，g：重力加速度，u_*：摩擦速度
d_m：平均粒径，d_{max}：最大粒径

流量としてそれぞれの洪水のピーク流量を用い，L2区間についてはA-a測線断面およびA-b測線断面，L3区間についてはA-c測線断面におけるu_*を求めた（図－9，図－10）。その際，マニングの平均流速公式を使い，粗度係数nは0.04として水深を求めた。また，この計算に必要なそれぞれの区間の河床勾配は2004年8月4日と2006年7月13日に測定した勾配の平均を用いた。河床材料の平均粒径と最大粒径を正確に決めることは難しいが，2006年7月13日の調査で下流区間のstep以外の河床材料の平均粒径が6 cm（表－10）であったので，いずれの区間，いずれの洪水においても平均粒径d_mを6 cmとした。最大粒径d_{max}として，2004年10月洪水については，洪水前の2004年8月4日の調査で得られた各区間のstep構成礫の最大粒径の平均値を，2006年7月洪水については，この洪水前の2006年7月13日に得られた各区間のstep構成礫の最大粒径の平均値を与えた（表－6，表－8）。以上のようにして，τ_{*m}，τ_{*cm}，τ_{*cmax}および関連の水理量を求めた。表－13，表－14に2004年10月洪水時のτ_{*m}，τ_{*cm}，τ_{*cmax}および関連の水理量を，表－15，表－16に2006年7月洪水時のそれらの値を示す。

それぞれの洪水におけるτ_{*m}とτ_{*cm}の関係から，いずれの洪水においてもその流れが，平均粒径あるいはそれより大きい礫を十分に移動させることができる掃流力を持つことが示される。しかし，τ_{*m}とτ_{*cmax}の関係からは，2004年10月洪水時にL2区間でstepの破壊，形成が起こったの

に，L１区間およびL３区間ではほとんど起こらなかったこと，また，2006年７月洪水によって，L１区間およびL２区間でstepの破壊，形成が多数みられたのに，L３区間ではstepの破壊，形成がごく僅かであったことを説明することは難しい。これらについては，今後の検討課題としたい。

表－13　下流区間における2004年10月洪水時の掃流力

区　間	ピーク流量Q (m^3/s)	勾配 i (%)	d_m (cm)	d_{max} (cm)	τ_{*m}	τ_{*cm}	τ_{*cmax}
下流区間のL１区間	0.61	7.5	6.0	30.0	0.147	0.05	0.105
下流区間のL２区間	0.61	8.3	6.0	30.0	0.157	0.05	0.105
下流区間のL３区間	0.61	9.0	6.0	33.0	0.169	0.05	0.110

表－14　下流区間における2004年10月洪水時の水理量

測線	流域面積 (km^2)	ピーク流量 (m^3/s) (再現期間)	勾配(i) (%)	流積(A) (m^2)	潤辺(S) (m)	流速(v) (m/s)	水深(h) (m)	フルード数(Fr)
下流区間A-a	0.378	0.61(７年)	7.5	0.32	2.14	1.92	0.194	1.39
下流区間A-b	0.378	0.61(７年)	8.3	0.31	2.22	1.95	0.187	1.44
下流区間A-c	0.378	0.61(７年)	9.0	0.30	2.13	2.03	0.186	1.50

表－15　下流区間における2006年７月洪水時の掃流力

区　間	ピーク流量Q (m^3/s)	勾配 i (%)	d_m (cm)	d_{max} (cm)	τ_{*m}	τ_{*cm}	τ_{*cmax}
下流区間のL１区間	0.89	7.5	6.0	30.0	0.183	0.05	0.105
下流区間のL２区間	0.89	8.3	6.0	30.0	0.193	0.05	0.105
下流区間のL３区間	0.89	9.0	6.0	33.0	0.209	0.05	0.110

表－16　下流区間における2006年７月洪水時の水理量

測線	流域面積 (km^2)	ピーク流量 (m^3/s) (再現期間)	勾配(i) (%)	流積(A) (m^2)	潤辺(S) (m)	流速(v) (m/s)	水深(h) (m)	フルード数(Fr)
下流区間A-a	0.378	0.89(15年)	7.5	0.42	2.34	2.16	0.242	1.41
下流区間A-b	0.378	0.89(15年)	8.3	0.41	2.46	2.18	0.230	1.45
下流区間A-c	0.378	0.89(15年)	9.0	0.39	2.35	2.28	0.230	1.52

第6章　おわりに

本研究では，階段状河床地形の破壊，形成と洪水との関係について，現地調査と水理学的な解析から検討した。得られた結果は以下のようである。

1．調査渓流の一部の流路で，再現期間7年と15年の洪水ピーク流量により階段状河床地形のstepの破壊と形成が見られた。しかし，再現期間2年のピーク流量では河床地形の変化にほとんど影響を及ぼさない。

2．谷幅が広く，土砂の堆積と流路の側方移動が起こりやすい場所では，階段状河床地形の破壊が生じやすい傾向が見られた。

3．急勾配の区間では，緩勾配の区間に比べてstepの破壊が少ない傾向が見られた。

4．洪水によってstepが破壊された区間では，破壊されたとほぼ同じ数のstepが新たに形成され，stepの総数は洪水前後でそれほどかわらなかった。

5．洪水によってstepが破壊された区間のstep構成礫の平均粒径および最大礫の平均粒径は，洪水前後でほとんど変化しないが，粒度分布については変化する例もみられた。

6．急勾配の区間では，緩勾配の区間に比べてstep構成礫の平均粒径および最大礫の平均粒径が大きい傾向がみられた。

7．勾配が急になるほどstep間隔が短くなるという従来から知られている傾向がみられたが，支流が合流する下流区間では，この関係は明瞭でなく，合流による流域面積の急拡に伴う流量の増大がこの関係を乱している可能性が考えられた。

8．step高は，step構成礫の平均粒径より数cm大きく，またstep高の1.4倍程度が，step構成最大礫の平均粒径の大きさに一致することから，step高がstep構成礫の大きさに制約されている可能性が高いと考えられた。

9．対象洪水における無次元掃流力（τ_{*m}）と平均粒径の無次元限界掃流力（τ_{*cm}）の関係からは，洪水時の流れが平均粒径あるいはそれより大きい礫を十分に移動させる掃流力をもつことが示されたが，無次元掃流力（τ_{*m}）と最大粒径の無次元限界掃流力（τ_{*cmax}）の関係からは，stepの破壊，形成を説明することは難しかった。

以上のように，本研究によって実河川で起こった階段状河床形の破壊と形成の実態が解明され，それらに関与する洪水規模，河床勾配および河床材料などに関する知見が得られた。しかし，階段状河床地形の破壊，形成を決めるstepの破壊，形成に関する水理学的説明については，今後の検討課題として残された。

本研究を進めるにあたりご指導，ご助言をして下さった西田顕郎講師，恩田裕一准教授に深く感謝申し上げます。また，本研究の調査に協力してくれた末広伸也君に感謝します。演習林の利用にあたり，筑波大学農林技術センター八ヶ岳演習林の皆様方には大変お世話になりました。皆様に心から感謝するとともに，厚く御礼申し上げます。なお，本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費基盤研究A（課題番号17208012）の援助を受けて行われました。記して謝意を表します。

引用文献

秋山智弘・眞板秀二・天田高白（2001）：山地渓流河床におけるstep-poolの構造の解析，筑波大学農林技術センター演習林報告，第17号，53-76.

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.

土木学会編（1974）：水理公式集　昭和46年改訂版，255.

Egiazaroff, I. V.（1965）：Caluculation of nonuniform sediment concentration, *Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol.91, HY4*, 225-246.

藤田正治・道上正規（1996）：千代川における淵の構造と魚類の生息，水工学論文集，第40巻，181-187.

藤田直二郎・池田宏（1996）：岩盤河床における巨礫の集積によるステップ・プールの形成に関する実験的研究，筑波大学水理実験センター報告，No.21，25-40.

Grant, G.E.（1988）：Morphology of High Gradient Streams at Different Special Scales, Western Cascades. Oregon. 砂防学会ワークショップ「荒廃渓流における地形変化と堆積土砂の制御」，1-12.

池田宏（1996）：河川から見た流域の土砂管理，第28回（社）砂防学会シンポジウム講演集，37-62.

北村秦一（1992）床固工群による渓流の水辺環境保全に関する考察，新砂防，45(1)3-13.

眞板秀二（1996）Sediment Waveの通過とStep-Pool河床の変形，砂防学会誌，Vol.49　No.2，21-27.

水野信彦・御勢久右衛門（1993）河川の生態学，補訂・新装版，築地書館，東京，5-6.

中村和央（2005）千曲川水系三沢川源流における2000年の洪水を契機とする階段状河床地形の変化，筑波大学第二学群生物資源学類生物資源生産科学主専攻卒業論文.

太田猛彦・高橋剛一郎編（1999）渓流生態砂防学，東京大学出版会，東京，13.

Summary

We conducted the field survey on step-pool sequences in a mountain stream in headwaters of the Misawa River in the Chikuma River System to clarify relations between their formation and destruction and flood events, and also tried to analyze those relations by hydraulics approach. The results are as follows;

1. Some steps were destroyed and newly created in some reaches by floods with the recurrence intervals of 7 years and 15 years in peak discharge. However, steps were not destroyed and not created by a flood with the recurrence interval of two years.
2. Step-pool sequences in a wider valley floor, where lateral shifts of channels often occurred

and sediment deposited easily, had a higher frequency in destruction.

3. Steps in gentle channel slopes were destructed easily as compared to steps in steep channel slopes.
4. In a reach where step-pool sequences were destroyed by a flood event, the number of steps was almost same before and after the flood event because destroyed steps were compensated by newly created steps.
5. In a reach where step-pool sequences were destroyed by a flood event, the mean diameter of gravels comprising steps and the mean diameter of maximum gravel in steps were almost same before and after the flood event. However, in some cases the distribution of gravels comprising steps was different before and after the flood event.
6. The mean diameter of gravels comprising steps and the mean diameter of maximum gravel in steps in steep channel slopes were larger than in gentle channel slopes.
7. The universal tendency that the step length decreases as the channel gradient increases was able to be found in research reaches. However, the tendency was not clear in the downstream reach of the junction. Such unclearness about the tendency might be caused by the abrupt increase in discharge due to joining streams.
8. The mean diameter of gravels comprising steps was several centimeters smaller than step heights, and the mean diameter of maximum gravels in steps was 1.4 times as large as step heights. This suggests that step heights might depend on the gravel size comprising steps.
9. The relation between the dimensionless shear stress (τ_{*m}) and the dimensionless critical shear stress for the mean diameter of bedload materials (τ_{*cm}) suggests that the flows for target floods had enough tractive force to transport mean size bedload materials. However, it is difficult to explain the formation and the destruction of step-pool sequences using the relation between the dimensionless shear stress (τ_{*m}) and the dimensionless critical shear stress for the maximum diameter of bedload materials (τ_{*cmax}). This could be a topic for future studies.

(2007年12月18日　受理)