

II-19 山地河川における流れ・流路形態と 砂礫の移動

北海道大学工学部 正 員 長谷川和義
同 上 正 員 藤田 睦博
同 上 学生員 新野 康二

1. まえがき

山地河川は、降雨水の集中運搬路であるとともに、土砂礫の生産・流出の場である。近年、これら二つの性質の解明のために、河川工学、水理学の立場からも種々の研究がなされるようになってきた。

これらのうち、沢田ら^{1) 2)}によって見いだされたステップ・プールによる土砂の捕そくならびに有効掃流力の著しい減少機構は、土砂流出が流路の形態と密接に関連していることを端的に示す重要な発見であった。しかし、山地河川の形態は非常に複雑であり、形成・破壊要因、形態と土砂流出の関係、破壊時の流出機構など、未知の事柄が山積している。著者ら^{3) 4)}は、昨年来、(1) 流路形態、(2) その流れにおよぼす効果、(3) 形成要因などについて、現地測量をおこない検討してきた。

本年は、対象河川を薄別川支川小川(宝来沢)に選んで同様な調査をおこなうとともに、(4) 流路形態と粒径別にみた土砂移動の関係を追求することにした。本報告は、これまでに得られた調査結果をまとめ、考察を加えたものである。

2. 小川(宝来沢)観測の概要

2-1 調査区間 小川流域の全体的特徴は、森ら⁵⁾に詳しい。ここでは調査区間の説明にとどめる。図-1は、観測区間の範囲を示すものである。薄別川合流点から500m上流に位置する6号床止ダム(SP=500)を起点に、上流1kmの区間(SP=1500)を選んでいる。図-2に見られるように、山頂の大規模な滑落によって埋積した谷面を再浸食中の小川は、中流部で勾配が緩く、堆積の先端にあたる下流部でむしろ急になっている。下流の堆積土は、滑落土砂が土石流となって流下したものとわれ、末端部は今なお土石流の通過地になっているものと考えられる。河床構成礫もこの区間で大きく、1mを越えるものもめずらしくないが、中流部では勾配の弱まりとともに小型化している。調査区間内の谷は深く、30mほどにもおよぶが、堆積深も深いため、基岩の露出はほとんど見られない。谷は底面で狭いV字状をなし、とくに区間下流のSP550~800は狭さく部をなしている。区間の左岸側6箇所、右岸側4箇所に地すべり崩壊面が見られる。谷幅の制約のために流路の分岐は多くなく、図-3に例示するように、SP900~1000、ならびにSP1250~1500において大規模な分岐が生じている。いずれも谷の彎曲部に相当しており、曲りにともなう側岸浸食が谷幅を広げている場所である。

2-2 調査項目と方法 調査は、1. で述べた視点をもとに、(1) 流路縦断波形、(2) 流路平面形

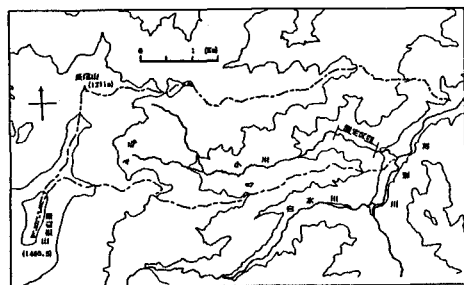


図-1 小川流域図

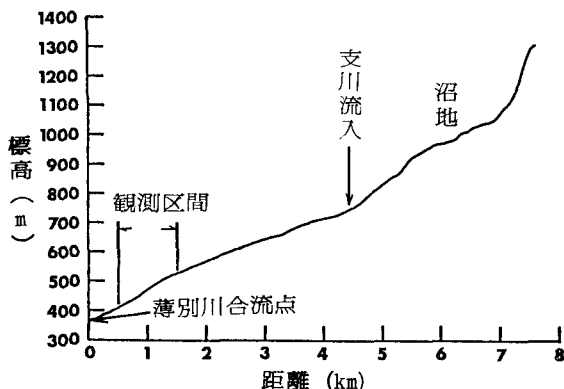


図-2 小川縦断面図

状の各測量、および(3)粒径分布測定を主要内容とし、(4)流速測定、(5)同区間の横断測量をあわせて実施した。

縦断測量は、定距離ごとの大礫上に設けた基準点測量を念入りにおこなったのち実施し、平面形状は平板測量によった。径50cm以上の礫については全て巻尺とアリダードによりプロットし、それ以下のものについてはスケッチによって記入している。平板測量は降雨と時間不足のためにSP550～850の範囲にとどまった。

粒径分布は、流路中央の河床表面粒子について調べることにし、2mおきの線格子法によって調査した。礫径は長・中・短軸につき測っている。

流速測定は、塩分流下法によっておこなったが、紙数の都合上、別稿^{d)}に報告する。

3. 流路形態の特性

3-1 縦断波形

図-4(a)は、主流路中央にそって測った河床の高低変化である。ただし、区間の平均勾配(=0.101)に対応する高さを引いて表わしている。これより、明瞭に発達したステップ・プールのありさまが読みとれる。のこぎりの刃状の起伏が、通常ステップ・プールとし

て認識されているものであり、これらに注目して波長分布と波高分布を調べると、それぞれ図-5,6のようになる。波長は、平均値6.6m、最頻値3.5m、最小・最大値それぞれ2m、18m程度である。波高は平均値0.62m、最頻値0.45m、最小・最大値0.1m、1.9mとなっている。このように広い範囲に分布するのは、流量変動に対応しているためと一応解釈できる。

図-5,6を子細に見ると、とくに波高分布が1mを境に異なる性質を示しているようにみえる。これらは、異なる母集団に所属している可能性がある。そこで、波高1m以上のステップに注目して位置を示すと、図-4(a)中の矢印のようになる。河床の高低変化はステップより長波長の成分を含んでおり、図中の実線(3点移動平均)のように変化する。矢印の位置はこれらの起伏と密接に関連している

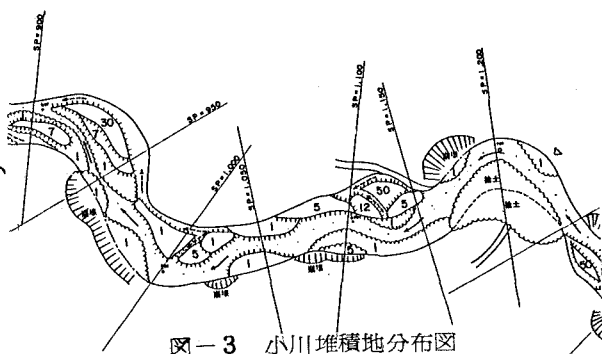


図-3 小川堆積地分布図

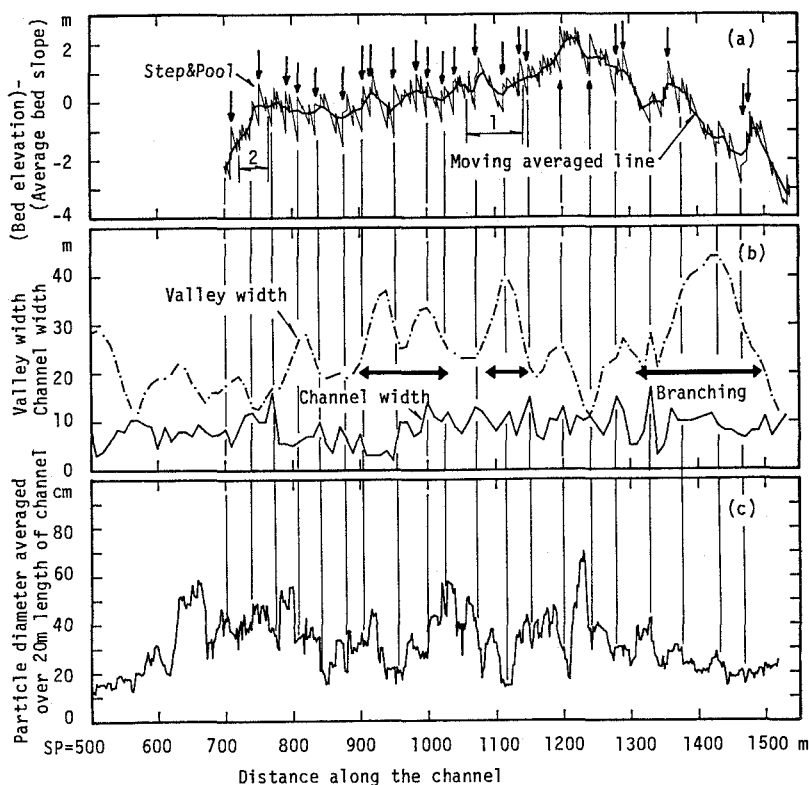


図-4 (a) 平均河床を引いた河床高の縦断変化

図-4 (b) 谷幅および流路幅の流路にそう変化

図-4 (c) 20m区間で平均した河床砂礫径の流路にそう変化

ようにみえる。

すなわち、移動平均の波だけでは判断し難いが、いくつかのステップの集まりで形成される長周期波の谷側のおちこみ部に、波高の大きなステップが集まる傾向にある。図中の縦線は、それらの位置を示すものであり、平均間隔が42mとなっている。

3-2 流路幅との関係 図-4 (b)は、観測区間の谷幅と流路幅との変化を描いたものである。ただし、データは北海道開発局による昭和57年9月測量の「小川堆積地分布図」を用いて得た。図-3はその一部を示すものであるが、測量前年の56年洪水、さらには、7年前の50年洪水による新しい堆積地が、植生を指標として調査され、描かれており、大洪水の履歴を見るには都合がよい。図-4 (a)で見い出した長波長の波の谷部の線を降して、幅の変化と比較すると、ほぼその山の部分に対応する。流路幅のせまりは、前述した1年生あるいは7年生の堆積地が図-3のように堆積したために起きたものである。すなわち、長波長の起伏はこれらの堆積地形と関連している可能性が高い。洪水時に谷幅いっぱいには広がった流れが、大きな波長の河床波を形成し、その高まりから低みにかけて波高の大きいステップをつくりだし、幅広のプールに至ったことが想定される。ただし、このステップの波長はさほど長くなく、通常のステップとあまり変わらないので、なんらかの長波長の堆積地形の上にステップが重なり、その前縁に高い階段形を形成したもののかもしれない。また、この測量図は、現地と照合すると、不正確な箇所が多く、さらに距離の測定が二つの測量間で異なっているため、両者の関連は確定的とは言えず、後章でさらに検討する。

一方、谷幅の変化は2.でも触れたように谷の彎曲と密接に関係し、曲り部で広がる。図中に示すように、幅広部では流路が分岐し、複雑なネットを形成することが多い。

3-3 砂礫径分布との関係 図-4 (c)は、主流路中央の河床礫径の距離変化をみたものである。ただし、10点20mにわたって移動平均をおこなっている。やはり波長30~40m程度の波形が明瞭に現われており、図-4 (a), (b)との対応もよい。波の高まりは、1m前後の巨礫の存在によるものであり、大ステップを構成

しているものと考えられる。これらの波上の高波数の波形は、通常のステップに対応するものといえる。ただし、距離の一致をうるのが難かしく、図の縦線の対応が必ずしも正しいわけではない。

図-7は、サンプル礫501個の粒径分布をみたものである。中軸径で1mの礫を境に分布が異なっていることは明らかであり、図-6の波高の特性と軌を一にしている。これから中央粒径、84%粒径を求めると表-1の値となる。同表中にはサンプル礫のうち通常のステップ構成礫と、大ステップ構成礫のそれぞれにつき平均を求めたものについても掲げてある。大ステップを除いたステップ波高の平均(0.48m)は、ステップ礫の短軸径にほぼ等しいが、その値は、すでに指摘されているとおり、中軸ない

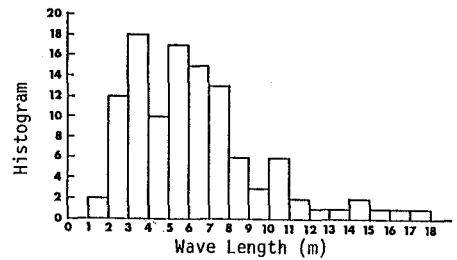


図-5 ステップ波長の頻度分布図

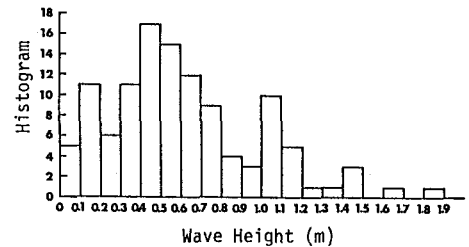


図-6 ステップ波高の頻度分布図

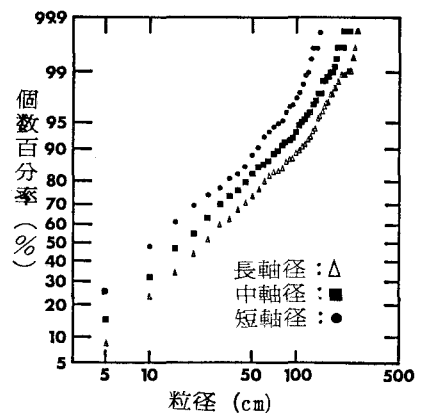


図-7 粒径分布

表-1 礫径調査の結果

	長軸径 (m)	中軸径 (m)	短軸径 (m)
ステップ構成礫の平均	1.04	0.79	0.58
大ステップ構成礫の平均	1.32	0.85	0.74
ds0	0.24	0.17	0.11
ds4	0.74	0.54	0.44

し短軸の d_{s4} によく一致することが同表からうかがわれる。これに対して、大ステップ波高の平均(1.21m)は、構成礫の長軸径に近い値を示す。しかし、実際には複数個の礫が、長軸方向を水平に向けてステップを形成していることが多く、それからすると、平均1.6個の重なりが存在することになる。

図-4(c)にもどると、粒径の区間的な平均が、谷幅の広狭と関連していることに気づく。すなわち、谷幅の広い区間で平均径が小さく、狭いところで大きくなっている。これは、谷幅の広い部分の流路が分岐し、一支脈あたりの流量が減少することと関係していよう。

このことは、河床表面の礫径が、流量によって厳然と規定されていることを示す重要な知見であろう。

3-4 平面測量の結果 図-8は、SP600~800の流路平面形の測量結果である。図中の記入数字は、「堆積地分布図」をもとに換算した植生年数であり、影の部分は堆積地が存在しているか、かつて存在していたことを示す。この図をもとに、前述した流路形態の特性を再検討してみる。縦断測量がSP700から上流でしかなされていないので、両者の重なる区間について、長波長の縦断波形、およびステップ波形と56年あるいは50年洪水による堆積地形の関係をみてみる。図中の三本の横断線は、長波長の縦断形の谷側への傾斜箇所(長波形底部)を示すものである。これらの線で区分される間に、10年あるいは4年の堆積地が砂州状にきちんとはまっており、流路幅の広狭をひきおこしている。

一方、ステップとプールの存在は明瞭であり、ほぼ10mの波長のものが3ステップずつ並んで一区間を構成している。

長波形底部の下流は、幅広のプールとなっており、図-4の傾向は大略確認できる。

3-5 スペクトル解析 各波形の対応をより詳しく検討するために、スペクトル解析を試みる。

図-9、10は、縦断波形、流路幅、谷幅、粒径に関するスペクトル密度を示すものである。ただし、分解能を1/400mにとっている。縦断形状については、35m近傍に明瞭なピークが現われており、これが、長波長の堆積波形の反映であることは間違いなからう。さらに、24m、15mなどにも卓越波があり、種々のステップ波形の存在がうかがわれる。

流路幅については、44mのところに強いピークがあり、図-4(b)の頂点間隔と一致している。縦断形状のピーク波長とはびったり一致していないが、再三指摘してきた事柄と大きな矛盾はない。この点、谷幅の方が縦断波形とよく似た傾向を示す。しかし、これらの幅のデータにはかなりの誤差が見こまれ、つめた議論はできない。

粒径に関しては、5点(10m)の移動平均を施した後求められている。ピークは30mのところにあり、縦断形状によく対応

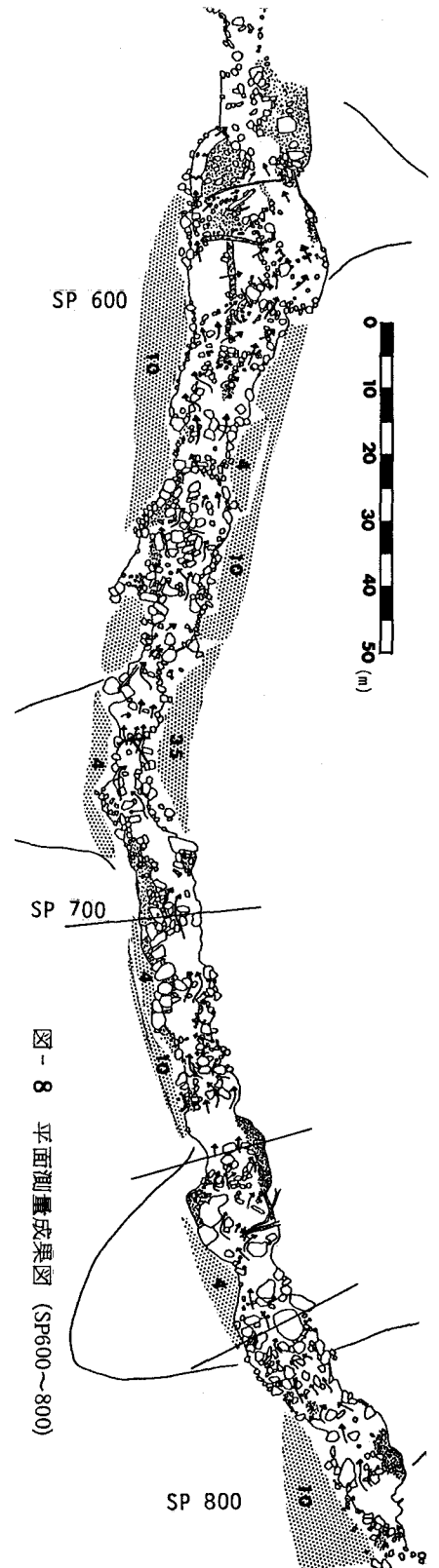


図-8 平面測量成果図 (SP600~800)

しているほか、15～16mのピークも一致している。

図-11は、流路幅、谷幅、粒径のそれぞれと、縦断形状との間のコヒーレンスを計算したものである。信頼しうる結果は、粒径との関係なので、これに着目すると12m、40m、50m、65mなどに比較的高い相関が見られるが、ピーク波長における相関は低い。これらの意味するところは現在よくわからない。

4. 流路形態と砂礫の移動

4-1 考察 前章までの事柄を、砂礫移動の観点からみて整理すると以下ようになる。

(1) 現河床には、4年および10年前の大洪水の履歴が、堆積地形ならびに30～40mの河床縦断起伏、および大ステップとして残されている。

(2) これらを構成する礫、とくに大ステップ構成礫は、当時の最大流量の痕跡と考えることができる。

(3) 分岐のために流量が減少する区間では、平均河床縦断径も減少する——すなわち、流量と粒径の対応は密である。

(4) ステップは、各種の波長・波高を有しており、通常のステップの波高は、一層の礫径に等しい。(平均的には d_{84} に近い。)これらは各種の流量に対応して形成され、記録として残されたものであろう。他の条件が同じであれば、最大規模のステップは直近の大洪水によって形成され、また、最小規模のステップは観測時の流量によってつくられたものといえよう。

(5) なお、(2)、(4)に関連して次の事柄が重要である。実験³⁾によれば、ステップの形成条件は、反砂堆が発生したのち、分級がすすみ、大きめの礫が反砂堆の頂部付近で限界掃流力状態になり、移動が停止することである。したがって、ステップ礫は形成流量に対して限界掃流力状態にあった可能性が大きい。そうでなければ、ある決まった場所にある粒径のものがそろい、波形を形成することができないものと考えられる。

4-2 9月1日洪水による検証 本年9月1日に比較的規模の大きい洪水が発生した。北海道開発局の測定結果では、最大 $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の出水をみている。

一方、著者らはこの出水の前後の時期に、要所におけるステップ・プールの写真撮影をおこなった。このうち、流路形状の単純なSP630～640地点について検討をおこなう。この地点で、写真-1にみられる短軸径0.5mの礫の移動が確認されている。

いま、流速式として、式形が簡単で精度もよいとされるHey⁷⁾のものをを用い、広矩形断面を仮定して最大流量時の水深を求め

$$Q = 5.74 \cdot \log\left(\frac{ah}{3.5 d_{84}}\right) \sqrt{gh \cdot \sin\theta} Bh \dots\dots\dots (1)$$

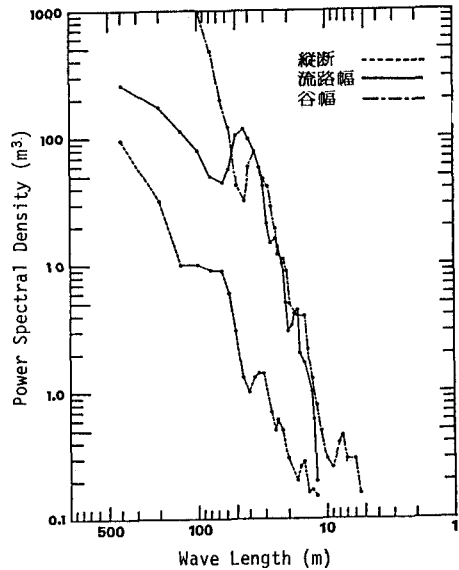


図-9 縦断波形等のスペクトル密度

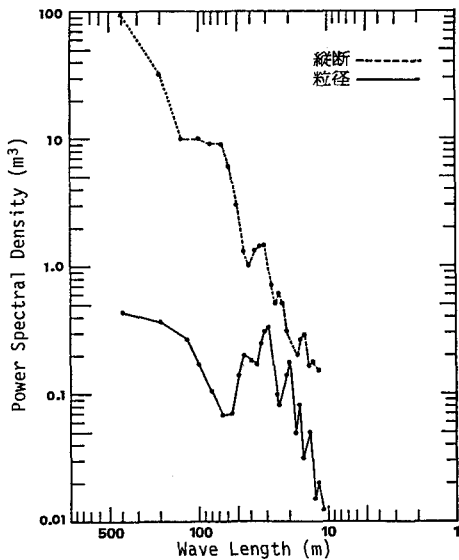


図-10 粒径変化のスペクトル密度

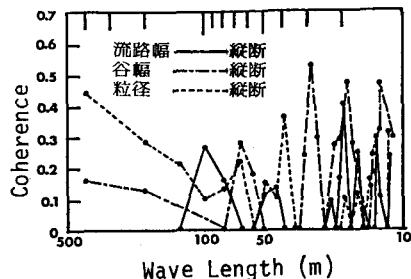


図-11 縦断・粒径間等のコヒーレンス

ただし、 Q =流量、 h =平均水深、 B =平均流路幅、 $\sin\theta$ = 平均河床勾配であり、 a =断面形状にかかわる係数で、11.1を用いる。上式に、 $Q=12.0\text{m}^3/\text{s}$ 、 $B=18.8\text{m}$ 、 $\sin\theta=0.11$ 、 $d_{84}=0.54\text{m}$ を入れると、 $h=0.42\text{m}$ をうる。

次に、芦田ら⁸⁾の急勾配流れにおける限界掃流力式

$$\tau_{*c} = 0.034 \cdot 10^{0.32d/h} (\tan\phi \cdot \cos\theta - \frac{s}{s-1} \sin\theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

により、限界状態の粒径 d を求めると、 $d=0.52\text{m}$ となる。ただし、式中、 s =礫の空中比重、 $\tan\phi$ =摩擦係数、 $\tau_{*c}=h \sin\theta / (s-1)d$ である。得られた礫径は、移動径にはほぼ一致しており、また平均的ステップ礫の径に等しい。中小規模のステップ礫の転倒が、所々に認められるのはこのことを裏づけている。

4-3 56年洪水流量の推定 図-8中に三本の横断線で示した長波形成部の礫径は、1.25mほどである。これらのステップが、56年洪水時に形成されたものとして、流量の推定をおこなってみる。式(2)から水深を求めることにし、 $\sin\theta=0.130$ 、 $\tan\phi=0.8$ 、 $s=2.65$ を代入すれば、 $h=0.89\text{m}$ となる。つづいて径深を求め、式(1)の h のかわりに代入し、流速の部分を実算すると、 3.83m/s を得る。この地域の谷幅は狭く、 $B=11.7\text{m}$ なので、これを用いれば流量は $Q=39.9\text{m}^3/\text{s}$ と推定される。56年8月の二度にわたる豪雨は、いずれも時間最大雨量が 30mm/hr ほどである。ラショナル式による逆算で、流出係数を求めると $f=0.44$ となる。本年9月1日における値が、 $f=0.25$ なので、一応認められる値といえよう。

5. あとがき

ステップの上部にはプールが形成されており、広い範囲の粒径粒子が堆積している。洪水時には、これらがまきあげられ流出するが、ステップが破壊した場合には、大小の砂礫が一気に運び出されることになる。したがって、プールにおける堆砂量、その粒度構成を知ることが、土砂流出の予測をおこなう上で非常に重要であろう。今後の調査課題である。また、この度の調査で明らかになってきた長波長の縦断波形、あるいは堆積地形が、いかなる河床形態に分類されるのか、はあえて本報でふれていないが興味深いことがらである。その土砂移動にはたず役割とともに検討していきたい。

謝辞 本研究の一部は、文部省科研費特別研究(1)「比較河川学の研究」(代表岸力)の補助を受けた。記して謝意にかえる。

参考文献

- 1) 沢田・芦田・高橋：山地河道における掃流砂の流送過程、25回水理講演会論文集、1981、2
- 2) 沢田・芦田・高橋：山地河道の変動と砂礫の流出に関する研究、26回水理講演会論文集、1982、2
- 3) 藤田・長谷川・大貫：山地河川の流路形態に関する調査研究、土木学会北海道支部論文報告集、41号1985、2
- 4) 長谷川・藤田・大島：山地河川の流れの抵抗則に関する研究、同上、1985、2
- 5) 森・長谷川・黒木・岸・四十谷：薄別川流域における微細砂の生産に関する研究、同上、1985、2
- 6) 長谷川・藤田：ステップ・プールに視点をのいた山地河川の流れの抵抗、30回水理講演会論文集、1986、2
- 7) Hey, R. D. : Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers, Proc. of ASCE, Vol. 105, No. HY 4, April, 1979
- 8) 芦田・大同・高橋・水山：急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究、京大防災研究所年報、第16号B、1973、4

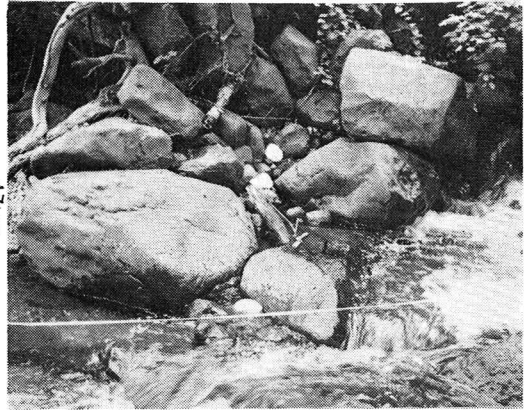


写真-1 8月19日撮影のSP630における
ステップ礫

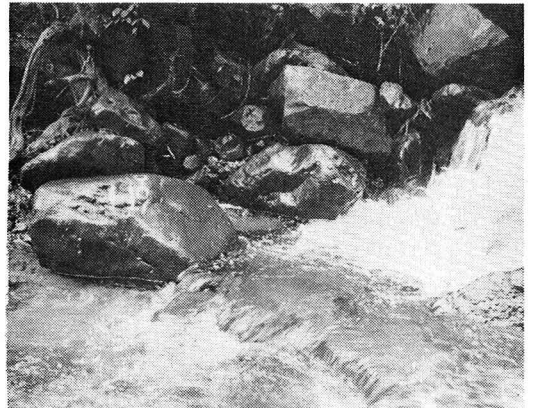


写真-2 同上9月25日撮影