

# 異流量による礫列・礫段河床の形状と抵抗則の変化に関する実験

Experimental Study On Bedforms And Flow Resistances For Step And Pool Systems  
Under The Various Hydraulic Conditions

北海道大学大学院 ○学生員 田中 航太 (Kota Tanaka)  
北海道大学大学院 正員 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)  
水資源開発公団 正員 竜澤 宏昌 (Hiromasa Tatsuzawa)

## 1. はじめに

山地河川では巨礫・大礫などで構成されるステップ部と小礫などで構成されるプール部が交互に連なる独特の階段状河床形態が見られ、山地の美しい景観を引き立てている。

ステップ・プールの形成に関して、現在までに多くの現地観測や実験が行われており、形成過程において様々な新しい知見が得られている。特に、河床が安定形成されるためには河床砂礫の粒度分布が重要であることが竜澤・林・長谷川<sup>1)</sup>によって明らかにされている。しかし、これらの河床形状に関しては不明な点も多く、水理条件の違いによる形状や抵抗則の変化についてまとまった知見が存在しない。

このため、筆者らは流量を5(l/s)から9(l/s)まで0.5(l/s)刻みに順次変えた場合の礫列・礫段の再現実験を行い、その形成過程と形状変化を観察した。また、対応する礫列・礫段河床における抵抗則の検討を行った。本論文では形状変化と抵抗則の検討結果を報告する。

なお、ここでいう礫列とは、図-1で示されるように、大礫が河床上を横断する形で一直線に並ぶ形状のものを指し、礫段とは礫列と対照的に大礫が円形に並ぶ形状のものを指している。



図-1 山地河川の概念図

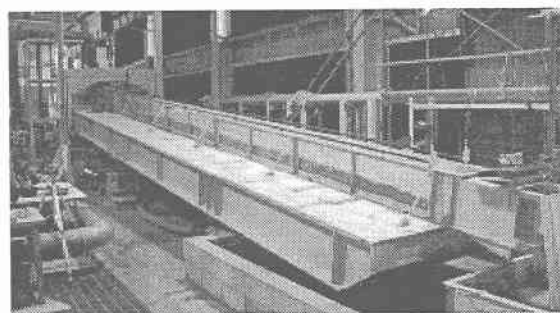


写真-1 実験に使用した直線水路

## 2. 実験装置・実験条件・実験方法

### 2-1. 実験装置

実験に用いた水路は、写真-1に示されるように長さ11m、幅30cm、深さ40cm、勾配1/10の片面アクリル板製の直線水路であり、水路上流端には整流版、水路末端には高さ19cmの固定堰をそれぞれ設けた。流量の計測には給水管に取りつけた電磁流量計を使用した。

### 2-2. 実験砂礫および実験条件

実験砂礫には、次式(1)のTalbot型の粒度分布を与えた混合砂礫を用いた。

$$P = \left( \frac{d}{d_{\max}} \right)^n \quad (1)$$

ここに、 $d_{\max}$ は砂礫中の最大粒径、 $P$ は $d$ の大きさの篩い目を通す砂礫の全体に占める重量比率である。一般に指数 $n$ が $1/2 \sim 3/4$ の時によく締め固まるといわれており、実験は、 $n=1/2$ 、 $d_{\max}=5.0\text{cm}$ の混合砂礫を用いた。タルボット曲線図を図-2に、砂礫の混合割合(重量比)を表-1にそれぞれ示す。

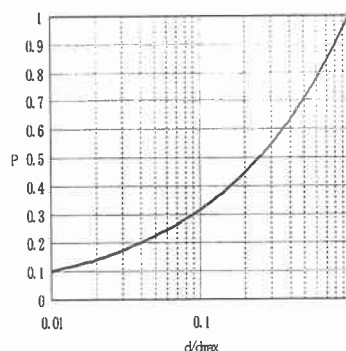


図-2 Talbot分布

表-1 混合割合

| 粒径(mm)  | $n=0.5$ |
|---------|---------|
| ~ 1     | 0.141   |
| 1 ~ 2   | 0.059   |
| 2 ~ 5   | 0.116   |
| 5 ~ 10  | 0.131   |
| 10 ~ 20 | 0.185   |
| 20 ~ 30 | 0.142   |
| 30 ~ 50 | 0.225   |

### 2-3. 実験方法

実験は、よく混合した実験砂礫を水路底面より25cm厚さに敷き詰めた後水締めを行い、水平に整形された初期河床に無給砂の条件で通水を行った。通水直後の側壁に沿う水深をデジタルカメラ写真と曲尺の読みから計測し、その後現れる河床変化について観察した。

各実験の条件を表-2に整理する。表の最下段の流量6.7(l/s)の実験caseは前回までの実験<sup>2)</sup>であり、得られたデータを第3章2節で用いている。表にある推定水深は、礫床河

表-2 実験条件表

| 実験区分 | 流量<br>(l/s) | 通水時間<br>(min.) | 実測水深<br>(cm) | 推定水深<br>(cm) | 限界水深<br>(cm) | 無次元掃流力        |               | 河床状態 | 礫列・礫段の<br>有無 |
|------|-------------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|------|--------------|
|      |             |                |              |              |              | $\tau_{*ds1}$ | $\tau_{*ds2}$ |      |              |
| A-1  | 5.0         | 120            | 2.70         | 3.34         | 3.05         | 0.057         | 0.040         | ○    | △            |
| A-2  | 5.5         | 120            | 2.80         | 3.47         | 3.25         | 0.059         | 0.042         | ○    | △            |
| A-3  | 6.0         | 120            | 3.20         | 3.60         | 3.44         | 0.062         | 0.044         | ○    | ○            |
| A-4  | 6.5         | 120            | 3.30         | 3.72         | 3.63         | 0.064         | 0.045         | ○    | ○            |
| A-5  | 7.0         | 120            | 3.70         | 3.84         | 3.82         | 0.066         | 0.047         | ○    | ◎            |
| A-6  | 7.5         | 120            | 2.80         | 3.40         | 4.00         | 0.058         | 0.041         | ○    | ◎            |
| A-7  | 8.0         | 120            | 2.30         | 4.08         | 4.17         | 0.070         | 0.049         | ○    | ◎            |
| A-8  | 8.5         | 15             | 2.40         | 4.20         | 4.34         | 0.072         | 0.051         | ×    | ◎            |
| A-9  | 9.0         | 15             | 2.40         | 4.31         | 4.51         | 0.074         | 0.052         | ×    | □            |
| A-10 | 6.7         | 120            | —            | 3.81         | 3.71         | 0.065         | 0.046         | ○    | ○            |

河床状態…

○：長時間通水により河床が安定し定常状態に落ち着く

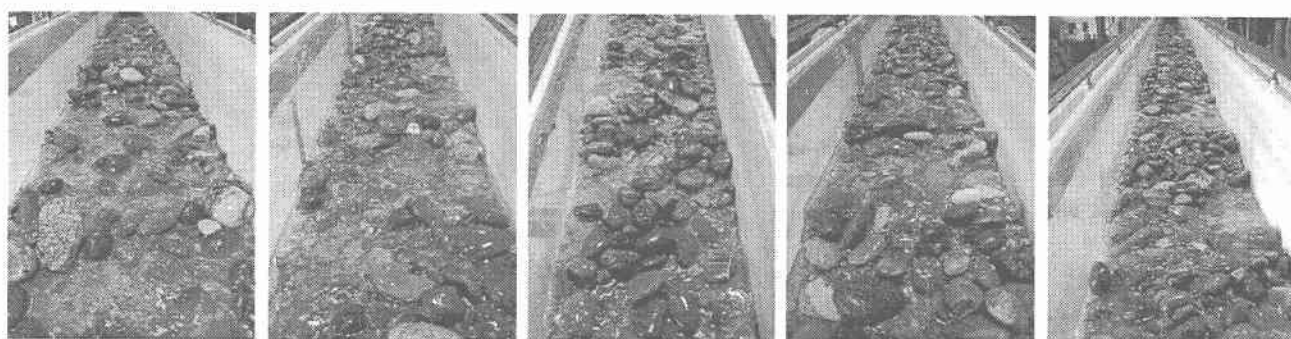
×：長時間通水にもかかわらず河床は安定せず移動状態にある

礫列・礫段の有無…△：一部分で礫列・礫段が確認できる

○：不明瞭ながら水路全域にわたって確認できる

◎：水路全域にわたって顕在化している

□：形成と破壊を繰り返し存在する

写真-2 5(l/s)通水後 写真-3 6(l/s)通水後 写真-4 7(l/s)通水後 写真-5 8(l/s)通水後 写真-6 9(l/s)通水後  
写真-2～6 通水後の河床形状写真

川において適合性が良好な後述のHey式(4)と流量から求めたものであり、この水深から無次元掃流力を計算している。また、河床状態と礫列・礫段の発生の有無に関する記号の意味は表中に示した。

### 3. 実験結果

#### 3-1. 実験状況

下流から撮影した通水後の河床写真を写真-2～6に示す。

流量5(l/s)、5.5(l/s)では、通水開始直後に最大粒径礫を含む砂礫の移動が観察されたが、通水開始後約1分で砂礫の移動はほとんど見られなくなり、河床はほぼ定常化した。通水後の河床は細粒砂が流送され粗粒化した。河床の高さについては通水前とほとんど変わらない状態であった。写真-2から見られるように、礫列・礫段は不明瞭ながらも部分的に確認できた。

流量6(l/s)から7(l/s)の場合では、いずれも通水直後から砂礫の活発な移動・分級および反砂堆の形成が観察された。通水開始から約2分ほどで最大粒径礫の移動がなくなり、約5分後には河床はほぼ定常状態に至った。6(l/s)通水後の河床には、写真-3,4に示すとおり、礫列・礫段の形成が認められた。

流量8(l/s)では、通水開始直後から最大粒径礫を含む砂礫の激しい移動が水路全域で起こった。その後、砂礫堆や礫

列・礫段などの小規模河床形態が形成され、長時間の通水の末、河床が定常状態に至る現象が観察された。写真-5、図-3のとおり、通水後の河床において礫列・礫段が両者の混在する様子が観察された。

流量8.5(l/s)、9(l/s)では、通水直後から激しい砂礫の移動が見られ、通水中は常に礫列・礫段の形成と崩壊を繰り返しながら最大粒径礫を含むすべての砂礫が移動する状況が観察され、長時間通水を行ってもその移動は止まることはなかった。通水後の河床には、写真-6に示すとおり礫列・礫段がほぼ水路全域に残留したかたちで認められた。形成されたステップ部はこれまで観察された大礫1個程度のステップ部と違い、最大粒径礫が幾重にも重なる大波高のステップ部であった。ステップ部の形成過程は以下のようである。①最大粒径礫が反砂堆峰近傍に停留する、②その直下に深い洗掘部が形成される、③洗掘部によって反砂堆峰近傍で停止できなくなった最大粒径礫が洗掘部におち込み、そこで再度停留する、④洗掘部で停止した最大粒径礫が流下してきた最大粒径礫の移動を停止させることで、やがて最大粒径礫の集積部ができあがる。この一連の現象が繰り返し行われると、最大粒径礫の集積部は大礫が幾重にも重なる大ステップ部に成長する。

#### 3-2. 通水後河床の比較

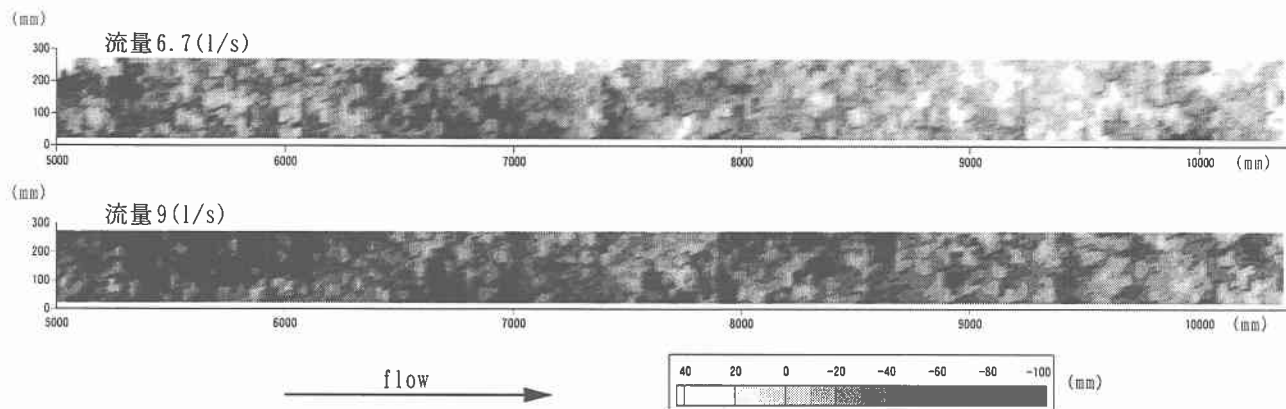


図-3, 4 流量6.7(l/s)と9(l/s)の河床平面図

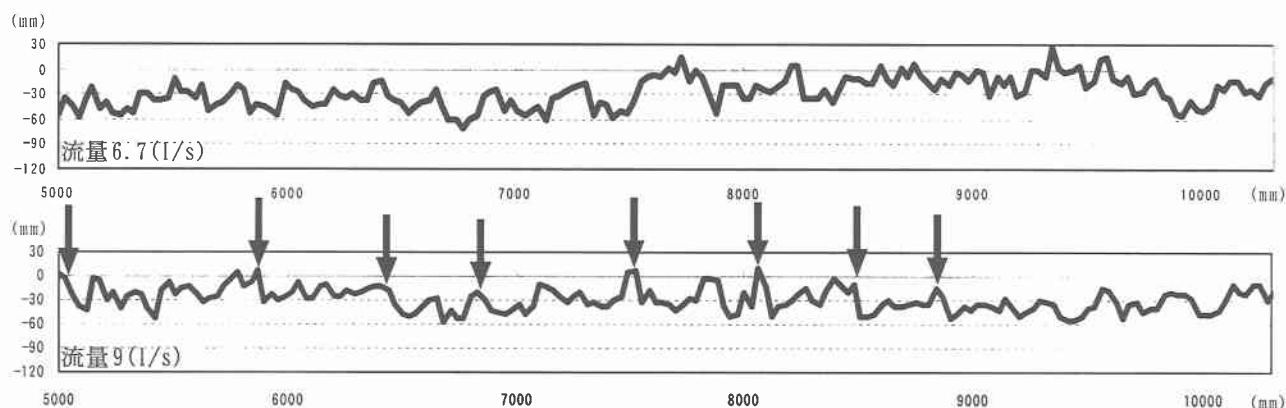


図-5, 6 流量6.7(l/s)と9(l/s)の縦断河床図

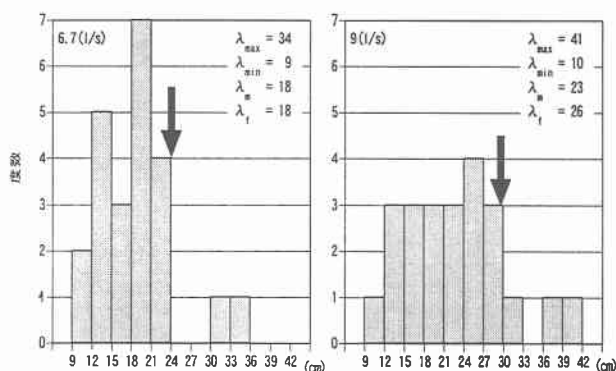


図-7 波長度数分布図

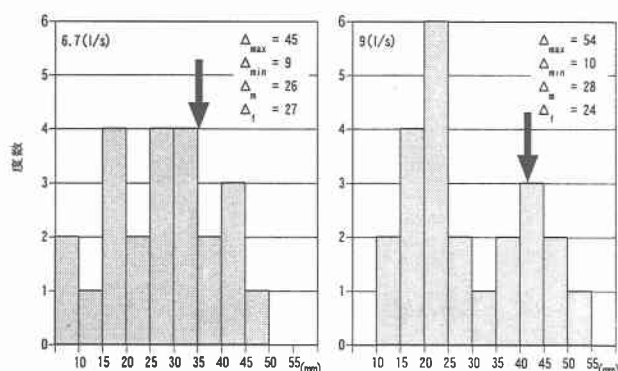


図-8 波高度度数分布図

河床が定常状態に落ち着く流量6.7(l/s)で形成された河床と、長時間通水を行っても河床が安定せず移動する流量9(l/s)で形成された河床の相違点について考察を行った。

図-3, 4は流量6.7(l/s)と9(l/s)の通水後の河床平面図であり、河床の高い部分を白、低い部分を黒で表している。この図より、流量6.7(l/s)の定常河床には砂礫堆があり、その反対側面にきれいな礫列が形成されている事がわかる。これは砂礫堆により単位幅流量が増加したためと思われる。一方、流量9(l/s)の場合においては礫列が水路全域において顕在化しているのが見て取れる。

図-5, 6は流量6.7(l/s)と9(l/s)の通水後の河床縦断図であり、河床勾配1/10を差し引いたものである。この図から、2caseともに水路全域において礫列・礫段の形成が確認できる。流量6.7(l/s)の場合では、上流側から流送されて

きた砂礫が下流側で堆積し、河床勾配が小さくなったことによって波長の短い礫列が形成された。流量9(l/s)の場合には、図-6中の矢印のように大ステップ部がほぼ等間隔で位置しており、大ステップ部下流には大礫1個のステップ部がいくつか並んで形成されているようである。

図-7, 図-8は流量6.7(l/s)と9(l/s)の場合の波長と波高の度数分布図である。 $\lambda_{max}$ は最大波長、 $\lambda_{min}$ は最小波長、 $\lambda_f$ は波長の最頻値、 $\lambda_n$ は平均波長、 $\Delta_{max}$ は最大波高、 $\Delta_{min}$ は最小波高、 $\Delta_f$ は波高の最頻値、 $\Delta_n$ は平均波高をそれぞれ表している。また、図中の矢印はそれぞれ竜澤<sup>3)</sup>による波長・波高の推定式(2)、(3)から求めた推定値である。

波長は、流量6.7(l/s)の場合に比べて流量9(l/s)の場合の方が大きく、広い分布形を示している。波高については、波長同様に9(l/s)の場合のほうが大きな値を示しており、

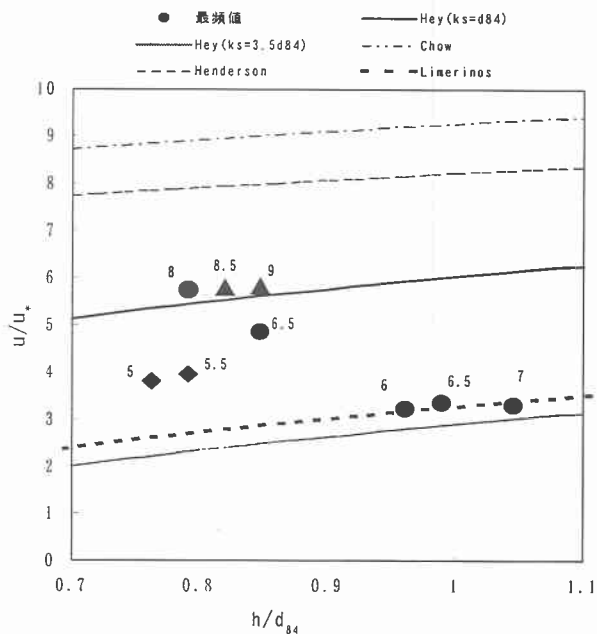


図-9 抵抗則の適合性

大礫1個程度の小さなステップ部と、大礫が二重になって形成される大きなステップ部が混在するようである。

推定式は、波長に関しては両者ともに非常に良好な結果が得られている。これに対して波高は流量6.7(l/s)の場合では適合性は良いが、流量9(l/s)の場合では、2種類のステップ部が混在するため2種類の推定式が必要なものと考えられる。

$$\lambda = 3.36 \sqrt{6.48 \sqrt{1 - \frac{1}{3}} I}^{-\frac{1}{6}} h_c \quad (2)$$

$$\Delta = 6.43 I^{\frac{5}{6}} h_c \quad (3)$$

#### 4. 礫列河床における抵抗則の適合性

現在までに礫床河川の抵抗則については多くの研究<sup>4)</sup>がなされており、様々な平均流速式が提案されている。山地河川においては、独特の河床形態であるステップ・プールや大礫などの河床形状抵抗が流速に大きく影響を及ぼしており、この形状抵抗をどのように評価するかが大きな課題となっている。

そこで、曲尺と近接デジタルカメラ写真によって計測した通水直後の水深データの最頻値を用いて、山地河川（礫床河川）の抵抗則の検討・考察を行った。検討に用いた式は以下に示す対数型のHey式(4)、Manning型のChow式(5)、Henderson式(6)、Limerinos式(7)である。これらの式は砂利床河川を対象とした式である。

$$\text{Hey 式} \quad \frac{u}{u_*} = 5.75 \log \left( \frac{ah}{k_s} \right) \quad (4)$$

$$\text{Chow 式} \quad n = 0.041 d_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

$$\text{Henderson 式} \quad n = 0.038 d_{90}^{\frac{1}{6}} \quad (6)$$

$$\text{Limerinos 式} \quad n = \frac{0.013 h^{\frac{1}{6}}}{1.16 + 2 \log \left( \frac{h}{d_{84}} \right)} \quad (7)$$

ここに、 $u$ は平均流速、 $u_*$ は摩擦速度、 $a=11.16$ （矩形断面）、 $k_s$ は粗度高、 $d_{50}$ は50%粒径、 $n$ はManning式の粗度係数、 $h$ は水深である。

以上の4式を用いて、横軸に $h/d_{84}$ 、縦軸に $u/u_*$ をとり検討した結果を図-9に示す。この図によると、流量6, 6.5, 7(l/s)の $u/u_*$ は流量8, 8.5, 9(l/s)と比較して小さな値を示している。これは前者のステップ部が大礫1個であるのに対して、後者のステップ部は大礫がいくつも斜めに重なる緩やかな上昇斜面を有するステップ部であるため、前者の波形勾配が後者に比べて大きなものとなり、形状抵抗が大きいからであると考えられる。

Chow式、Henderson式は砂利床河川によく適合するとされているが、この図によれば、礫床河川を対象とする本実験では $u/u_*$ 値が全体的に大きく出ており、適合性は良いとはいえないようである。形状損失を考慮した修正が必要である。

Hey式については、流下状況によって粗度高 $k_s$ の値を変化させることで非常によく適合する結果となる。すなわち、流量6(l/s)～7(l/s)の場合のようなステップ・プールの形成やそれによる跳水を伴う流れに対しては $k_s=3.5d_{84}$ 、流量8(l/s)～9(l/s)のような通水直後から水路全域にわたって射流で流下するような流れに対しては $k_s=d_{84}$ とすることで良い一致が生ずる。

Limerinos式については、流量6(l/s)～7(l/s)の場合のようなステップ・プールの形成やそれによる跳水を伴う流れに対しては非常によく適合しているが、全域射流で流下する流れに対してはあまり適合性は良くないようである。

#### 5. 終わりに

礫列・礫段の形成実験については、最大粒径の移動限界掃流力以上の流量を与えることによって、今までの実験では観察されなかった大波高ステップ部を有する河床波が観察でき、きわめて自然に近い河床を実験水路上に再現することができた。

抵抗則については、流況（河床が安定状態に落ち着く場合と長時間の通水にもかかわらず安定せずに砂礫の移動が活発に行われる場合）によって異なる粗度高をとることにより非常に良い結果が得られた。

今回はステップ・プールの形成と抵抗則について考察・検討を行ったが、この結果を山地河川から流出する土砂機構の解明に役立てたい。

#### 参考文献

- 1) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：溪流河川における河床砂礫の混合特性と階段状河床形の形状特性，水工学論文集，第42巻，pp. 1075-1080, 1998
- 2) 田中航太・竜澤宏昌・長谷川和義：礫列河床における砂の洗掘・体積と輸送量に関する実験，第55回土木学会年次学術講演会論文集，Ⅱ-232, 2000
- 3) 竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義：溪流の小規模河床形態に関する研究，土木学会論文集，No. 656/Ⅱ-52, 83-101, pp. 83-101, 2000
- 4) 長谷川和義：山地河川の形態と流れ，水工学シリーズ8 8-A-8，土木学会水理委員会，pp. A-8-1～A-8-22, 1988