

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

ROLES OF HETEROGENEOUS PROPERTY OF BED MATERIALS FOR THE FORMATION OF STEP-POOL SYSTEMS IN MOUNTAIN STREAMS

竜澤 宏昌¹ ・ 林 日出喜² ・ 長谷川 和義³

Hiromasa TATSUZAWA, Hideki HAYASHI and Kazuyoshi HASEGAWA

¹ 正会員 水資源開発公団 試験研究所 水工研究室 (〒338 埼玉県浦和市大字神田 936番地)

² 正会員 水資源開発公団 試験研究所 水工研究室長 (〒338 埼玉県浦和市大字神田 936番地)

³ 正会員 工博 北海道大学工学研究科 (〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

Recently, studies on step-pool systems in mountain streams become increasing for the concerns with environmental conservation. However, there cannot be found any study to elucidate roles of heterogeneous property (grain size distributions) of bed materials for the step-pool formations. This paper presents that 1) the grain size distributions of the bed surface materials sampled in the upper Ibi River show the type of Talbot distribution, which is known to give the closest packing ;2) comparative experiments of step-pool formations using the heterogeneous bed materials with Talbot type distribution and non Talbot type distribution, resulted in that stable and well developed step-pools were formed in the case of the former materials, but any step-pools were not found in the case using the latter materials ;3) evaluating equations for a wave length and a wave height of a step-pool were newly derived by considering the effect of the grain size distribution of Talbot, and they agreed with the modes of the experimental data fairly well.

Key Words : mountain streams , step-pools , heterogeneous bed materials , grain size distribution , Talbot distribution , movable bed experiment

1. はじめに

溪流河川には、主に巨礫や大礫が集積して形成されるステップ部と、比較的小さい粒径の砂礫で河床が構成されるプール部とが交互に連なる階段状の河床形が多くみられる。この溪流に特有な形態の構造や性質を解明することは、土砂水理学上興味深いばかりでなく、溪流環境の主体を成す河川形態の保全や復元・創造技術などへの応用に繋がるものと思われる。芦田・江頭ら¹⁾は、この河床(波)形の成因および形成条件に関して、混合砂礫を用いた実験により詳しく検討しており、出水時の①混合砂礫の分級を伴う活発な移動②反砂堆河床波の形成③反砂堆峰近傍での大礫の停止にあることを明らかにしている。また、長谷川・上林²⁾、上林・長谷川³⁾、長谷川⁴⁾は、この形態を、ステップ部を構成する礫が河川の横断方向に直線的に並びプールの掘れが比較的小さい礫列(リブ)と、ステップ礫が平面的にみて円弧状に並び流れが滝状に落下してプール部に小規模の滝

壺を形成している礫段(ステップ・プール)とに区別している。彼らは、後者の形態が④河床に形成される反砂堆による強制水面波の波長と、射流上に発生する3次元の定常波の波長とが同調することによって形成されることを同種の実験と線形安定解析から明らかにしている。しかし、これらの形成条件として特に重要と考えられる砂礫の混合特性については考慮されておらず、一様粒径の河床には形成されないという実験事実があるのみである。この点に関して、著者らは、実溪流の河床で得られた砂礫の粒度分布例ならびにこれを種々考慮した混合砂礫を用いた実験の考察から、力学的に安定した階段状河床波の形成と、河床を構成する砂礫に最大密度を与える混合特性との間に何らかの因果関係があるのではないかと考えている。

本論では、階段状河床波の形成要件やその安定性および形状特性と、河床砂礫の混合特性との関連性について、これまでの実験によって得られた成果を報告する。

2. 河床砂礫の粒度分布とTalbot曲線

溪流河川の粒度分布を重量百分率で捉えた例として、昭和46年に建設省中部地方建設局越見山系砂防工事事務所が実施した木曽川水系揖斐川支川白谷流域(流域面積約21km², 河川延長約12km, 河床勾配0.03~0.10)における河床材料調査⁶⁾がある。この調査は、当流域の土石流に関する基礎データの収集を目的として実施されたものであり、揖斐川合流点から上流まで9断面、各断面左右岸付近の2箇所において採取した0.5m×0.5m×0.5m(×2層)の試料について、篩い分け試験、単位容積重量試験、比重試験が行われた。図-1は、これらのうち、最上流部の3断面12試料の篩い分け試験結果から求めた粒度分布である。試料のサイズから、最大径は500mm以下に制限されており、これを超えるサイズの礫の分布は評価し得ないが、少なくとも、礫列や礫段スケールの河床波を形成する中小規模の出水において活発に移動する砂礫の粒度分布を捉えたものと考えられる。図-1によると、12試料のデータは全て片対数紙上で下に凸形の共通した傾向を有しているのがわかる。この傾向は、中下流のデータにおいても若干のばらつきがあるもののほぼ共通して認められている。また、これらの分布を粒径毎に最大径で除して表した結果を図-2に示す。図中には太線により次式で表されるTalbotの曲線^{6), 7)}を併せて示した。

$$P=(d/d_{max})^n \tag{1}$$

同式は、コンクリートの粗・細骨材などの混合材料の締め易さ、すなわちその最大密度を与える粒度分布の理想型を表す曲線として、Talbotが実験の結果から提示したものである。式中の d は材料中のある粒径、 d_{max} は材料中の最大礫径、 P は d の大きさの篩い目を通して材料の全体に占める重量比率であり、指数 n が $1/2\sim 1/4$ の場合によく締まると言われている。図-2によると、 d/d_{max} に対する分布は式(1)の指数 n が $1/2\sim 1/3$ のTalbot曲線にほぼ従っており、調査当時の白谷の河床が非常に締め易い粒度分布であったことを読み取ることができる。

これらの結果は自然溪流の河床表面を構成している砂礫が各々互いによく咬み合い密に締まっているという従来からの一般的な認識とも符合しており、式(1)に示したTalbot曲線は溪流河床の粒度分布の一般的な特性をうまく説明し得る知見と言えそうである。粒度分布の特性は、粗度係数、流速分布、流砂量、河床波の形成および安定性、Armoringなどの研究に不可欠な情報である。ここでは、この知見を基に、河床材料の混合特性との関連性について不明確であった階段状河床波に着目し、その形成要件や安定性および形状特性について混合砂礫を用いた移動床実験によるアプローチを試みた。

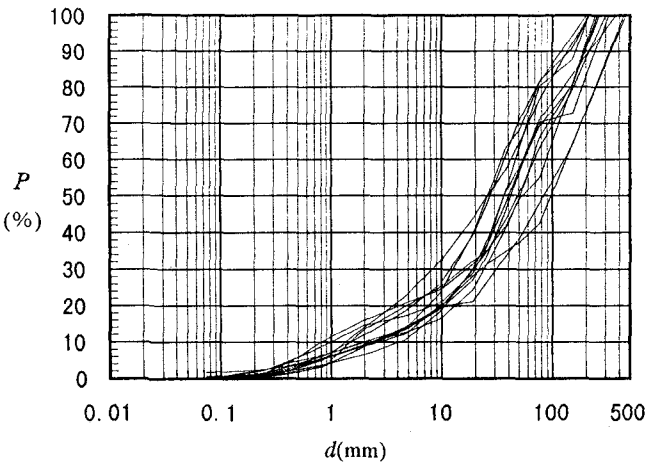


図-1 河床砂礫の粒度分布例(白谷上流)

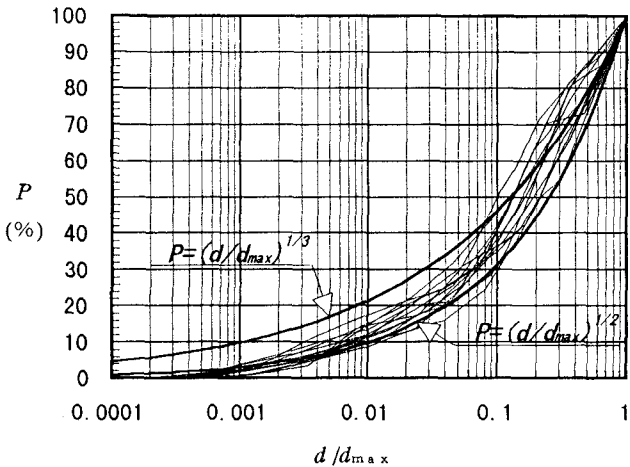


図-2 粒度分布例とTalbot曲線の比較

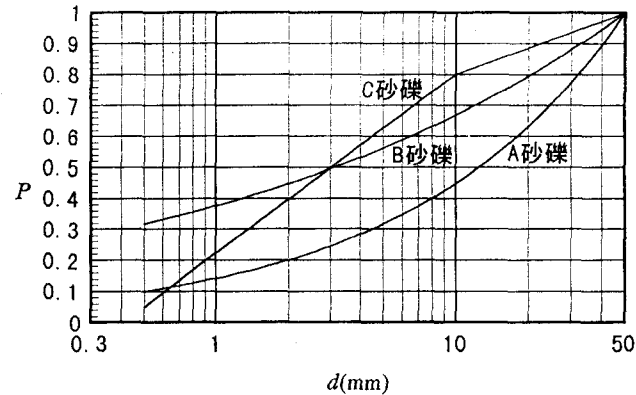


図-3 実験砂礫の粒度分布

表-1 実験砂礫の混合重量割合

	A砂礫	B砂礫	C砂礫
~ 0.5 mm	0.100	0.316	0.050
0.5 mm ~ 1.0 mm	0.041	0.060	0.174
1.0 mm ~ 2.0 mm	0.059	0.071	0.173
2.0 mm ~ 5.0 mm	0.116	0.115	0.229
5.0 mm ~ 10.0 mm	0.131	0.106	0.174
10.0 mm ~ 20.0 mm	0.185	0.127	0.086
20.0 mm ~ 30.0 mm	0.142	0.085	0.051
30.0 mm ~ 50.0 mm	0.225	0.120	0.063

3. 混合砂礫を用いた移動床実験

実験に用いた砂礫は、図－3および表－1に示すとおり、Talbot型の粒度分布を有するA砂礫($n=1/2$)およびB砂礫($n=1/4$)、片対数紙上で上に凸形の分布を有するC砂礫の3種類である。各砂礫の最大径はいずれも5.0cm(篩目目通過粒径)、平均粒径はそれぞれ順に1.7cm, 1.0cm, 0.74cmである。

実験には、図－4に示すとおり、長さ11m、幅(B)30cm、深さ40cmの片面アクリル板製の水路が設置された勾配可変式の実験装置を用いた。水路上流端には循環水の貯水槽と整流板が取り付けられており、流量の計測にはφ50mmおよびφ200mmの2系統の給水管に設置されている電磁流量計を使用した。

実験は、よくブレンドした実験砂礫を水路底面より15cmの高さに敷きつめて水締めを行い、河床面をほぼフラットの状態にした後、無給砂の条件で通水し、河床変動の状況観察、通水後の河床の粒度分布および河床形状の測定を行った。

表－2に実験条件を示す。ここに、 d_m ：各砂礫の平均粒径の初期値、 d_{max} ：各砂礫中の最大径、 I ：初期河床勾配、 u_{*cm} ：平均粒径砂礫の限界摩擦速度、 u_{*cmax} ：Egiazaroffの式で与えられる最大径礫の限界摩擦速度、 Q_{cm} ：平均粒径砂礫に限界掃流力を与える流量、 Q_{cmax} ：最大径礫に限界掃流力を与える流量、 Q ：実験通水量である。なお、 Q_{cm} および Q_{cmax} については、各々の限界摩擦速度 u_{*c} を式(2)および相当粗度を d_m とした抵抗則式(3)に代入して、水深 h および平均流速 u を計算し、これらの結果を式(4)に代入して求めた結果である。

$$h = u_{*c}^2 / (gI) \tag{2}$$

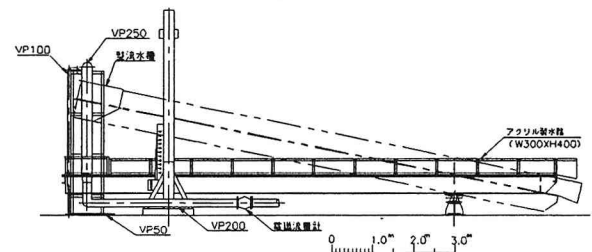
$$u/u_{*c} = 6.0 + 5.75 \log(h/d_m) \tag{3}$$

$$Q_c = Bhu \tag{4}$$

実験水路への通水時間は、各ケースとも、所定の流量の状態、1回あたり2分間、断続的に計3回の通水を繰り返している。なお、実験装置の都合から、通水を始めてから所定の通水量に達するまで30～60秒を要している。

表－2 実験条件

Run No.	d_m (cm)	d_{max} (cm)	I	U_{*cm} (cm/s)	U_{*cmax} (cm/s)	Q_{cm} (l/s)	Q_{cmax} (l/s)	Q (l/s)
A	1.667	5.0	0.05	11.61	14.64	6.9	16.2	15
B	1.000	5.0	0.05	8.99	13.00	3.2	12.2	10
C	0.736	5.0	0.05	7.71	12.18	2.0	10.5	9



図－4 実験装置の概要

4. 実験結果

(1) 河床変動の状況

RunA：1回目の通水直後から、表層にあった砂分と、概ね数cm程度以下の礫分が活発に移動し始め、河床には反砂堆河床波が形成される。最大径程度の礫の移動も認められ、その多くは反砂堆峰付近に停止し集積するが、この時点では安定性に乏しく、その下流部で生じた洗掘部に落下し埋没する礫も認められる。1回目の通水終了時点の河床表面には、水路全体にわたり、礫分の集積部と砂分で占められる部分とに明瞭に分級され、これらが交互に連なるのが観察された。2回目の通水以降、河床面の粗粒化とともに、礫集積部の下流でみられた洗掘も止まり、礫相互の咬み合いが顕著なステップ部がいくつも認められるようになる。写真－1は、3回目の通水終了後、少量の水を流した状態で下流側から撮影した河床面の状況である。手前から明瞭な礫列をなす2つのステップ部が見てとれる。



写真－1 階段状河床波（礫列）の形成状況

RunB：1回目の通水では、砂礫全体の4割程度を占める砂および細粒分の活発な移動とともに、これが主体を成す顕著な反砂堆河床波が形成される。粗粒分は最大径程度の礫も含めて大半が反砂堆河床波峰付近で留まることはなく、通水終了時点の河床表面にはRunAのような明瞭な分級が認められない。2回目の通水では次第に反砂堆河床波峰付近に大きい礫が停止、集積し始めるが、RunAの1回目の通水で見られたように、その下流の洗掘によって安定性を失い崩壊を繰り返す。3回目の通水で、水路上流から徐々に河床が粗粒化し始め、そこにRunAと

同様にして、ステップ部が認められるようになる。2分間の通水が終了した時点で、RunAの結果ほど明瞭でないが、水路上流側に階段状のステップ部が形成された。

RunC: 砂礫の移動とともに反砂堆河床波が形成されるものの通水中に発生と消滅を繰り返し、波高もRunA, RunBに比較して小さい。このため、この反砂堆河床波には最大径礫の移動を停止させるような働きが認められない。また、通水を重ねても、通水終了後の河床面には、平坦な河床に礫分がランダムに分布するのみであり、規則性は認められない。

以上が混合砂礫中の最大径程度の礫が限界掃流力状態にある条件下での河床変動の状況である。

RunAおよびRunBについては、芦田・江頭らが示した階段状河床波の形成条件でありかつそのメカニズムとも言える混合砂礫の活発な分級、反砂堆の形成、大礫の停止という現象を伴い、ほぼ安定した階段状河床波の形成が認められた。一方、RunCでは形成が認められない。これらの結果から、階段状河床波の形成要件として、河床砂礫の混合特性が深く関与していること、特に、その粒度分布がTalbot型（片対数紙上で下に凸の粒度分布形）であることに重要な意味があると言えそうである。

また、粒度分布がいずれもTalbot型であるRunAとRunBとを比較すると、細粒分の割合が小さく、そのぶん粗粒分の割合が大きいRunAの方が通水の初期から安定した階段状河床波の形成が認められた。このことから、安定した河床波が形成される要件として、細粒分の割合がある程度小さいことが必要と考えられる。これが満たされなければ、RunAの通水初期とRunBの2回目の通水までについて述べたように、大中礫の移動→反砂堆河床波峰付近での停止および集積→当該部下流の洗掘→集積部の不安定化→集積部の崩壊を繰り返す要因となり、安定したステップ部が形成されない。この要件は、RunBで形成が認められたのが通水3回目で、河床が相当に粗粒化した状態であったこととも符合する。

(2) 粒度分布

次に、実際に階段状河床波が形成された部分の粒度分布について調べた結果を図-5に示す。各試料とも3回の通水後に採取したものであり、採取範囲は、A砂礫が水路縦断方向の位置で上流より、2.8m～3.8mおよび7.1m～8.1mの2箇所、B砂礫が3.3m～4.3mの1箇所、比較のため河床波が形成されなかったC砂礫の3.9m～4.9mの1箇所、いずれも1mの範囲で河床表面より5cm程度の部分としている。図-5には、(1)式($d_{max}=50\text{mm}$, $n=1/2, 3/4$)を併記している。この結果によると、通水初期から形成が認められたA砂礫の場合、初期の粒度分布に対して多少

粗粒化しているが、概ね初期の分布形を維持している。また、B砂礫については、興味深いことに、A砂礫の分布形にほぼ一致している。これらの結果は、前述のRunAおよびRunBの河床変動の推移、およびRunCで階段状河床波が形成されなかったことを総合すると、片対数紙上で下に凸の粒度分布形（この場合は、Talbot型： $n=1/2\sim 3/4$ ）が典型的な階段状河床波の形成限界を与える分布形であることを示唆するものである。

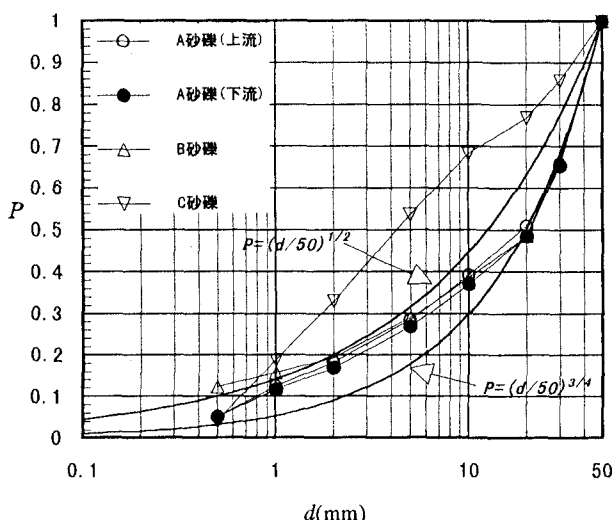


図-5 階段状河床波形成部の粒度分布

(3) 形状特性

階段状河床波が認められたRunAおよびRunBについて、3回の通水終了後に行った縦断河床形の計測結果を図-6に示す。図の横軸は水路縦断方向の位置を示し、縦軸は初期河床面に対する通水後の河床高を示している。いずれもステップ部とプール部が認識できる範囲で、ステップ部についてはこれを構成している礫のうち概ねステップ部の平均高さを与える礫の最高点を、プール部についてはその最深点をそれぞれ代表高さとして計測している。また、これらの結果から求められた河床波の波長と波高のヒストグラムを図-7に示す。

A砂礫の結果は、図-6に示すように、波長(最頻値)35～40cmの小規模波を25波形、また、これらが6波長で半波形、12波長程度で1つの波形をなす中規模波を捉えている。溪流河川における中規模波の存在は以前から指摘されており⁴⁾、それが交互砂州によるものと解釈されているが、RunAで得られた河床形状においても交互砂州の形態が不明瞭ながら認められており、これを裏付ける結果である。

また、B砂礫の結果において、下流側で明瞭な河床波が発生し得なかった理由として、上流からの掃流砂の供給によって粗粒化が進まず、結果的に3回の通水だけでは、前述したような階段状河床波の形成限界を与える粒度分布に至らなかったことが挙げ

られる。なお、図-6の水路縦断軸で3.3mより上流については、実験の不手際により計測データを棄却した範囲であり、河床波の未形成範囲を示すものではない。

5. 実験波高・波長の理論式による検討

長谷川⁴⁾は、礫列・礫段の波高・波長をステップ礫の無次元掃流力 $\tau_{*c0}=0.05$ とする仮定のもとに導いている。しかし、本実験のように河床ないしステップ部の構成礫がTalbot型の分布をなす場合には、無次元掃流力が遮蔽効果を受けて変化するものと見なければならない。混合砂礫の限界掃流力として、Egiazaroffの式を用いることにすれば、指数 n を有するTalbot分布砂礫の最大径に対する無次元掃流力 τ_{*cmax} は、平均粒径に対する無次元掃流力を τ_{*cm} として、

$$\left. \begin{aligned} \tau_{*cmax} &= \chi_n \tau_{*cm} \doteq 0.05 \chi_n \\ \chi_n &= \{\log 19 / \log 19 (d_{max}/d_m)\}^2 \\ &= \{\log 19 / \log 19 (1+1/n)\}^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。図-8は n の違いに対する χ_n の影響をみたものであり、 n が大きいほど、すなわち粗粒化するほど χ_n は大きくなり限界掃流力が大きくなるという性質を示している。さて、礫列の波高 Δ は、多くの野外計測や実験から、

$$\Delta \doteq d_{max} \quad (6)$$

とみなすことができる。最大径 d_{max} が限界掃流力状態にあるものとすれば、式(5)、(6)から、

$$\Delta \doteq d_{max} = hI/(s\chi_n\tau_{*cm}) \quad (7)$$

となる。射流が卓越する溪流の流れに適合する抵抗則として、

$$u/u_* = 6.5(h/d_{max})^{1/4} \quad (8)$$

を採用すれば、水深の推定式が次式ようになる。

$$h = \{d_{max}^{1/4} Q / (6.5g^{1/2} I^{1/2} B)\}^{4/7} \quad (9)$$

ここで、

h : 水深, I : 平均河床勾配, g : 重力加速度, s : 礫の水中比重, u : 流速, u_* : 摩擦速度, B : 水路幅, Q : 流量, である。

式(9)を式(7)に代入整理することにより、

$$\Delta = 6.5^{-2/3} (s\chi_n\tau_{*cm})^{-7/6} I^{5/6} h_c \quad (10)$$

を得る。ただし、

$$h_c = (Q^2/gB^2)^{1/3} \quad (11)$$

であり、また、式(9)においても $d_{max} \doteq \Delta$ の置き換えを行っている。次に、波長 λ に関しては、反砂堆の波長式を用いることにより、

$$\lambda = 2\pi h (Fr^2 - 1/3)^{1/2} \quad (12)$$

のように推定できる。抵抗則式(8)から Fr^2 を求め式(7)、式(10)を用いると、若干の計算によって次式が得られる。

$$\lambda = 2\pi (6.5)^{-2/3} (s\chi_n\tau_{*cm} I)^{-1/6} \cdot \{6.5^2 (s\chi_n\tau_{*cm} I)^{1/2} - 1/3\}^{1/2} h_c \quad (13)$$

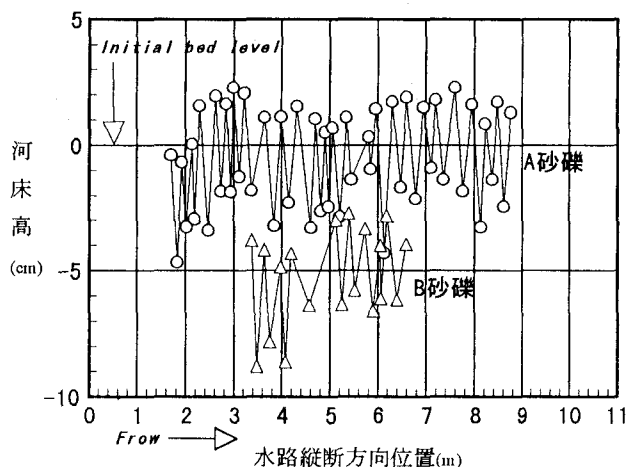


図-6 縦断河床形の計測結果

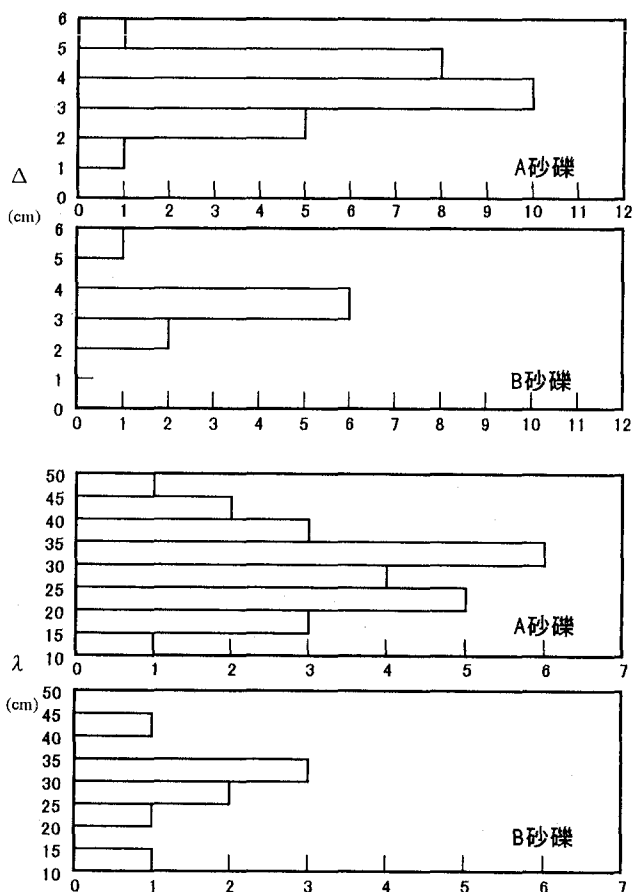


図-7 実験波高・波長のヒストグラム

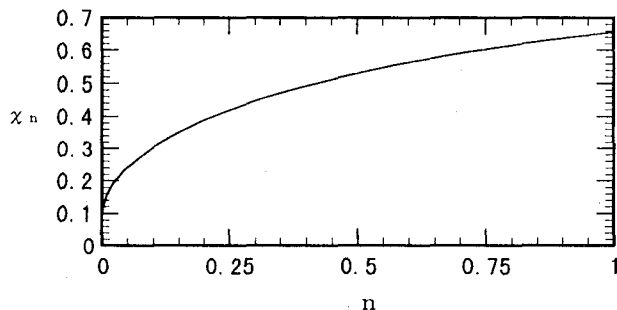


図-8 Talbotの指数 n と χ_n の関係

図-9、図-10は、 $s=1.65$ 、 $\tau_{*cm}=0.05$ として、式(10)、式(13)より求めた Δ/h_c と I の関係、 λ/h_c と I の関係である。計算に用いたTalbotの指数 n は、RunAおよびRunBで通水後に得られた河床の粒度分布とTalbot曲線との関係を示す図-5の結果を考慮し、 $n=1/2$ 、 $3/4$ とした。また、図中には、RunAおよびRunBの結果も示しており、細線により、図-7に示した実験波高・波長のヒストグラムを Δ/h_c および λ/h_c の頻度分布として表している。

図-9、図-10によると、計算波高は、図-5において粒径 d が概ね20mmを超える粗粒分の範囲で実験結果を近似している $n=3/4$ として求めた方が実験値との適合性が良いことがわかる。また、計算波長は、 n すなわち α_n の差による影響は少なく同程度であり、RunAおよびRunBで得られた最頻値を概ね捉えている。

6. 結論

溪流河川に特有な階段状河床波の形成と河床砂礫の混合特性との関連性について得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 揖斐川支川白谷の河床材料調査で得られた河床砂礫の粒度分布（重量比率）が、従来から混合材料の締め易さ、すなわちその最大密度を与える粒度分布の理想型とされてきたTalbotの曲線に従っていることを見出した。
- 2) この片対数紙上で下に凸形のTalbot型の粒度分布を持つ2種類と、そうでない1種類の混合砂礫を用いた移動床実験から、これら砂礫の混合特性の違いが階段状河床波の形成の有無や形成状況を大きく左右することを確認した。今回の実験条件の範囲に限れば、Talbot型の粒度分布を与えた河床には典型的な河床波が形成されるのに対し、片対数紙上で上に凸形の粒度分布を与えた河床には全く形成されない。さらに、安定した河床波が認められた部分の粒度分布を調べた結果、いずれも指数 n が $1/2 \sim 3/4$ のTalbot型分布に近い分布であった。これらの結果を総合すると、河床波の形成および安定化の要件として、Talbot型の分布形が何らかの意味をもっている可能性が高い。
- 3) 河床砂礫の粒度分布がTalbot型であることを前提に、Egiazaroffの式を用いて混合砂礫中の最大径礫の限界掃流力を評価し、河床波の波高および波長の推定式を理論的に導いた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、建設省中部地方建設局越見山系砂防工事事務所ならびに水資源開発公団徳山ダム建設所から大変有益で且つ貴重なデータ

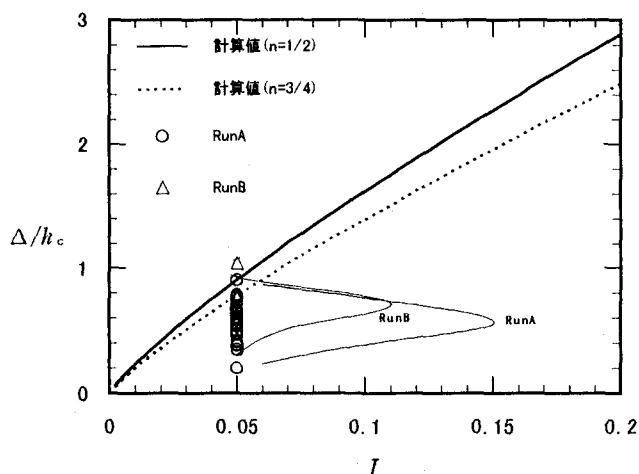


図-9 Δ/h_c と I の関係

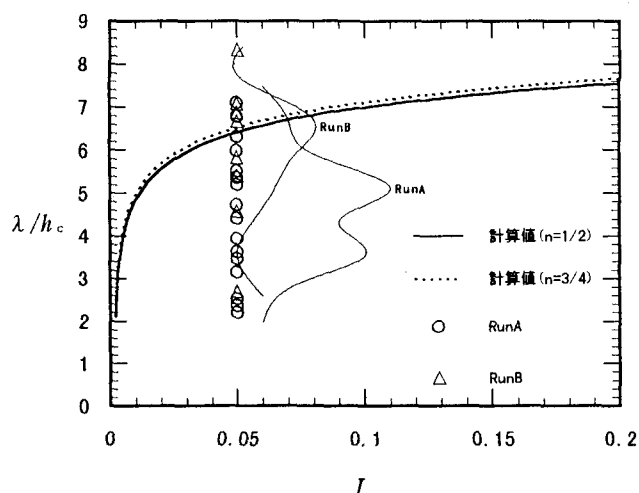


図-10 λ/h_c と I の関係

を提供して頂いたこと、また、実験に際し、北大4年生の入江卓君から多大な協力を得たことをここに付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 芦田・江頭・安東：階段状河床形の発生機構と形状特性に関する研究，第28回水理講演会論文集，pp743-749，1984
- 2) 長谷川・上林：溪流における淵・瀬（ステップ・プール）の形成機構とその設計指針，水工学論文集第40巻，pp893-900，1996
- 3) 上林・長谷川：山地河川の3次元河床波発生に関する水理学的解析，土木学会北海道支部論文集，第53号（B），pp32-37，1997
- 4) 長谷川：溪流の淵・瀬の水理とその応用，1997年度（第33回）水工学に関する夏期研修会テキスト，ppA-9 1-20，1997
- 5) 建設省越見山系砂防工事事務所：昭和46年度白谷河床材料調査報告書，pp20-29，1971
- 6) 宇梶文雄：フィルダムノート -材料の基本と実際-，日刊工業新聞社，pp50-51，1979
- 7) 赤井浩一：土の粒度配合による締め固め特性の変化，土と基礎 Vol. 5，No. 5，pp19-22，1957

(1997. 9. 30受付)