

山地河道における階段状河床形の構造

芦田 和男・江頭 進治
沢田 豊明・西本 直史

GEOMETRIC STRUCTURES OF STEP-POOL BED FORMS IN MOUNTAIN STREAMS

By *Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Toyoaki SAWADA*
and *Naoshi NISHIMOTO*

Synopsis

Step-pool bed forms are common in steep slope streams. In the authors' former paper, a criterion has been presented to predict the occurrence of step-pool bed forms as well as these geometric features in experimental flumes. The present study will discuss the applicability of theoretical, experimental results obtained from basic studies.

Field surveys for stream geometry, bed materials, histories of flood flow discharges and so on were carried out at two reaches in mountain region of Jintsu river. The results of data-analyses are presented for wave lengths and heights of step-pool systems, bed materials and flood flows. Then, it is discussed whether the methods having been obtained from basic studies could or could not predict the field data of the occurrence, mean wave lengths and heights.

1. 緒 言

一般の山地河道には一連のステップとプールからなる階段状河床形がみられる。これは、巨礫や巨石が流路横断方向へ連なってステップ状になり、その上・下流側がプール状を呈しているものである。このような縦断形を有する流路の河床表面にはアーマ・コートが形成されている。

階段状河床形は、上述のような特徴をもっており、その形成・発達・破壊のプロセスを通して、さらにプール部における砂礫の貯留現象を通して山地河道の流砂量とその粒度分布を支配する一つの大きな要因になっている。例えば、河床形全体が比較的小さい粒子からなる流送砂礫に覆われている場合と、プール部の一部に流送砂礫が貯留されている場合とでは、同一流量であっても流砂量は大きく異なってくる。さらに極端な例として、プール部に貯留土砂がない場合には、アーマ・コートが破壊されない限り流砂量は無視できるオーダーになる。このような状態から流量が増加し、アーマ・コートの破壊が起こるような条件になると、流砂量が急激に増加するといった現象が現われる。

階段状河床形と流砂に関連する上述のような問題を明らかにするためには、階段状河床形の発生・発達・破壊等の機構を明らかにするとともに、波長、波高などの幾何学的特性量に関する知見が重要な意義をもってくる。著者ら¹⁾²⁾は、このような観点より階段状河床形に関する研究を進めており、これまでに水路実験を通して発生条件や形状特性などに関する次のような知見を得ている。すなわち、階段状河床形が形成されるためには、

- (a)混合砂であること、
- (b)平均粒径よりも大きい砂礫が活発に移動するばかりでなく、一方において最大径が停止すること、
- (c)流れが射流であって、分級砂礫によって反砂堆が形成されること、

以上、三つの条件が必要であることを示した。一方、形状特性について

(d)波長は反砂堆のそれにほぼ一致し、

(e)波高はアーマ・コートの平均粒径程度である

ことを示してきた。

本研究は、これらの研究の次の段階として、このような基礎研究の成果が、実際の山地河道にみられる階段状河床形の発生と形状特性値の推定にどの程度適用性をもっているのかを検討するとともに、これをさらに発展させるため、現存する階段状河床形の特性値から、過去における出水規模の推定が可能か否かの考察を行うものである。なお、この課題については一部すでに発表³⁾しているが、本報はその後得られた知見をこれに加えたものである。

2. 河道調査と結果の概要

階段状河床形に関する調査は、神通川上流域の蒲田川およびその支川足洗谷において行われた。これらの位置図および調査区間を **Fig. 1** に示す。図中の R_G および R_A 区間がそれぞれの調査対象区間である。調査は、1984年8月に実施された。調査項目は、平水時における流路中心軸の河床縦断形状、横断形状、測量時の水面幅、河床材料および流量資料等である。河床位は、光波測距儀を用いて測定された。このとき、2~3m 間隔の測定を原則にして、階段状の形状が再現できるよう留意している。流路横断形は、蒲田川について踏査程度、足洗谷に関しては代表性を考慮して7断面について詳細に調べられた。河床材料の調査は写真撮影と踏査によって行われた。なお、蒲田川に関しては、縦断測量の直後に、調査区間の上流端において橋脚工事が行われ、そのため流路が変更されるとともに河床が整地されたために、横断形の測量ができなかった。しかし、流路変更直後において、水面下にあった河床表面の状態を詳細に観察できた。

Fig. 2 および **Fig. 3** は、それぞれ蒲田川および足洗谷の流路平面と縦断形を示したものである。平面図と縦

Fig. 1 Sketch of study area upstream of Jintsu river

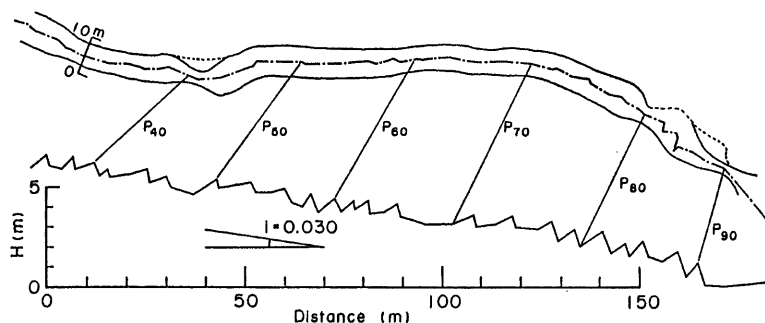


Fig. 2 Plan and elevation views of the study reach in Gamata river

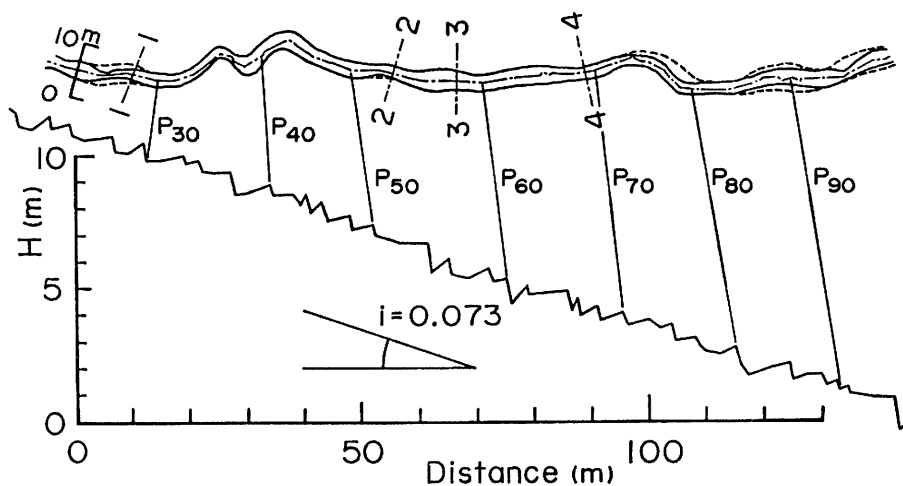


Fig. 3 Plan and elevation views of the study reach in Ashiarai river

断面図において、それぞれ対応する点が10測点ごとに線で結ばれている。なお、平面形は、流路中心軸の線形と調査時（平水時）の水際線である。**Fig. 4** は足洗谷の横断面図の一例である。**Photo 1, 2** はそれぞれ蒲田川および足洗谷において調査時に撮影した河道の状況を示したものである。**Photo 3, 4** には、それぞれ蒲田川および足洗谷における河床材料の状況を示している。

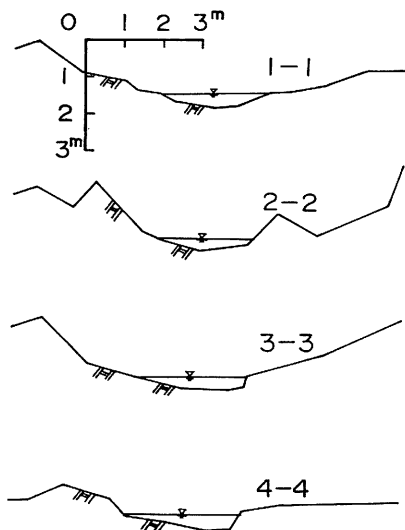


Fig. 4 Cross sectional shapes of the study reach in Ashiarai river



Photo 1 An example of step-pool bed forms in the study reach of Gamata river



Photo 2 An example of step-pool bed forms in the study reach of Ashiarai river



Photo 3 An example of armour coat formed on stream bed of Gamata river



Photo 4 An example of sediment composing the reach of Ashiarai river

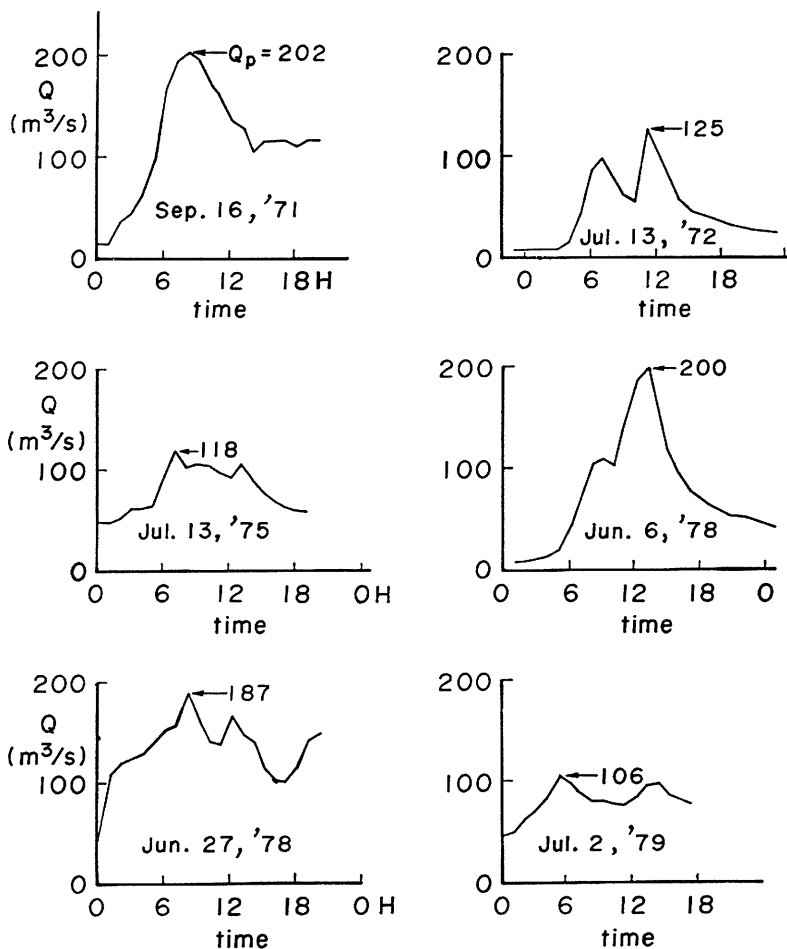


Fig. 5 Several discharge hydrographs during flood flows observed at the gauging station of Gamata river

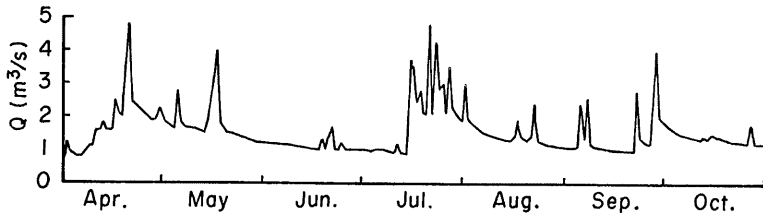


Fig. 6 Series graph of daily maximum flow discharges in 1983 at the gauging station of Ashiarai river

Table 1 Characteristic values of study reaches

Note	Drainage area (km ²)	Length of the reach surveyed (m)	Mean bed slope	Particle size of yielding area (m)		Particle size of armour coat (m)	
				Mean	Maximum	Mean	Maximum
R. Gamata	77.5	280	0.030	0.1	1~2	0.56	1~2
R. Ashiarai	6.5	200	0.073	0.1	1~2	0.50	1~2

以上は、調査の方法およびその結果の概要の一部である。これらより、緒言で述べたような階段状河床形の特徴が理解されよう。たとえば、Photo 1, 2 より、巨石が横断方向へ連らなってステップを構成している状況が分るとともに、これらの連続的な構造が Fig. 2 および 3 から理解される。さらに河床表面におけるアーマ・コートの状況が Photo 3 から理解される。

流量資料の収集に当たっては、上述のような河床形がいつの時点で発生したのかを知っておくことが重要である。蒲田川に関しては、明確な情報はないが、現在の河床形に対しては、十数年間の経過を調べれば十分であると判断した。そこで、蒲田川の流量については、1971年以後における蒲田川第一測水所(62.5 km²)のデータを収集した。一方、足洗谷に関しては、1982年に護岸工事が行われ、その年の11月の完成直後に河道整地が行われている。しかも、1984年には特記すべき出水はなく、現在の河道は、1983年の出水によって形成されていることが明らかである。したがって、足洗谷の出水資料は1983年の記録より収集した。観測点は調査区間 (Fig. 1 の R_A) の最上流端にある。これらの出水資料のうち、蒲田川については大きいものから6出水を選び、これらを Fig. 5 に示し、足洗谷に関しては、1983年の4月~10月の流量時系列を Fig. 6 に示している。なお、以下の計算に際し、蒲田川については、調査区間 (Fig. 1 の R_G) の上流端の流域面積に対する測水地点の流域面積の違いを考慮して、Fig. 5 に示す流量の1.24倍を蒲田川のデータとして使う。

以上の調査より得られた蒲田川および足洗谷に関する流域特性値ならびに以下の解析に用いる諸量を Table 1 に示す。

3. 階段状河床形の発生と形状特性

3.1 発生領域

まず、議論に先がけて河床砂礫の移動の程度を把握しておく。階段状河床形の発生以前における河床材料は、生産土砂のそれにほぼ等しいものとし、Egiazaroff⁹⁾ の式を適用して各粒径の移動限界流量を求めると、Table 2 の結果を得る。本表の計算に当たっては、つぎのような諸量を採用している。すなわち、相当粗

Table 2 Critical flow discharges corresponding to the initiation of motion for each particle size, which are calculated with Egiazaroff formula for the critical motion of sediment mixture

Sediment diameter(cm)	10	20	40	60	80	100
R. Gamata (m ³ /s)	7.0	17	58	130	242	334
R. Ashiarai (m ³ /s)	0.2	0.5	1.5	2.7	4.5	6.6

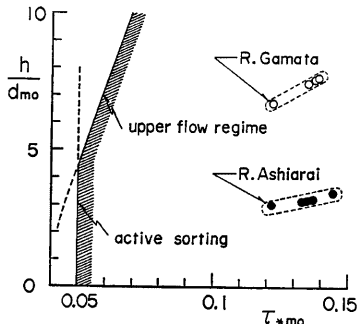


Fig. 7 The domain of step-pool bed forms to occur

τ_{*m0} および h/d_{m0} は生産土砂の平均粒径を用いて作られた無次元量であり、蒲田川の数値については、150m³/s 以上のピーク流量について示しており、足洗谷については、3m³/s 以上のピーク流量を対象として図示している。図示の領域のうち、upper flow regime および active sorting の境界は、それぞれ次式で与えられている。

$$\frac{h}{d_{m0}} \leq \left(6.0 + 5.75 \log \frac{h}{\alpha d_{m0}}\right)^2 s \tau_{*m0} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_{*m0} \geq \beta \tau_{*cm} (\beta > 0) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h : 水深、 d_{m0} : 相当粗度 ($\alpha=2.6$)、 s : 砂礫の水中比重、 $\tau_{*m0}=u_{*s}^2/sgd_{m0}$ (u_{*s} : 摩擦速度)、 τ_{*cm} : 平均粒径 d_{m0} の無次元限界掃流力、 β : 分級現象の活性度を表わす係数で、1 よりも大きい、これに近い値である。ここでは $\beta=1$ としている。さて、Fig. 7 の結果によれば、全データが階段状河床形の発生領域になっており、Fig. 5 および Fig. 6 の出水は、階段状河床形の発生条件を満たしていたことが分る。事実、前章で示したように、また、以下に示されるように、調査対象河道においては顕著な階段状河床形がみられる。

なお、Whittaker・Jaeggi²⁾ は、河床勾配が 0.075 以上で、かつ反砂堆の形成条件が満たされたときに階段状河床形が形成されることを提案しているが、Table 1 に示すように、ここで対象としている流路の河床勾配は、0.075 よりも小さいことを付記しておく。

3.2 波 長

前述の Fig. 2 および 3 に示す縦断面図において、波長をステップの間隔長で定義し、これに基づいて波長の頻度分布を調べた結果を示すと Fig. 8 のようである。まず、蒲田川についてみれば、 $\lambda=5\sim 6\text{m}$ の領域にある。平均値は $\lambda=8.1\text{m}$ である。一方、足洗谷についてみると、最頻値は $\lambda=4\sim 5\text{m}$ にあり、第 2

度 k_s は、著者らの実験結果²⁾ より、 $k_s=2.6d_{m0}$ ($d_{m0}=10\text{cm}$: 初期平均粒径) とし、流路横断形には、足洗谷については Fig. 4 に示す断面 3-3 を採用し、蒲田川については水面幅 B をレジーム則 $B=5Q^{1/2}$ を用いて推定し、これを流路幅とする長方形断面で近似している。Table 2 の結果は、河床材料が、もし生産土砂で覆われており、しかも Fig. 5 および 6 のような出水があれば、最大径よりも小さい材料はかなり活発に移動することを示すものである。したがって、これらの流路においては、緒言で述べた条件(b)が十分満たされているものと思われる。さらに、この条件と条件(c)すなわち、分級砂礫による反砂堆の形成条件が同時に満たされているかどうかを調べるため、階段状河床形の発生領域区分図上に調査データを示してみよう。その結果を Fig. 7 に示す。ここで、

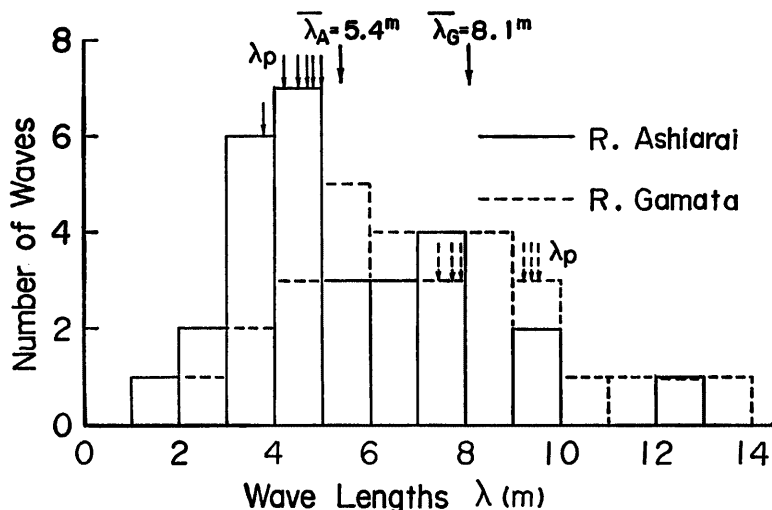


Fig. 8 Frequency distribution of wave lengths in the two reaches

位は $\lambda=3\sim 4\text{m}$ のところにある。また、平均値は $\lambda_G=5.4\text{m}$ である。このように、各河道とも河床形は単一波長をもっているわけではない。これは、対象としている河道が種々の規模の出水を経験しているためである。すなわち、ある波長のものは消滅したり、またあるものは分裂したりするため、実際の階段状河床形は、ある種の統計的構造を示すものと思われる。しかしながら、このような統計的な構造を把握するためには、河床形の変形過程に関する詳細な議論が必要となる。

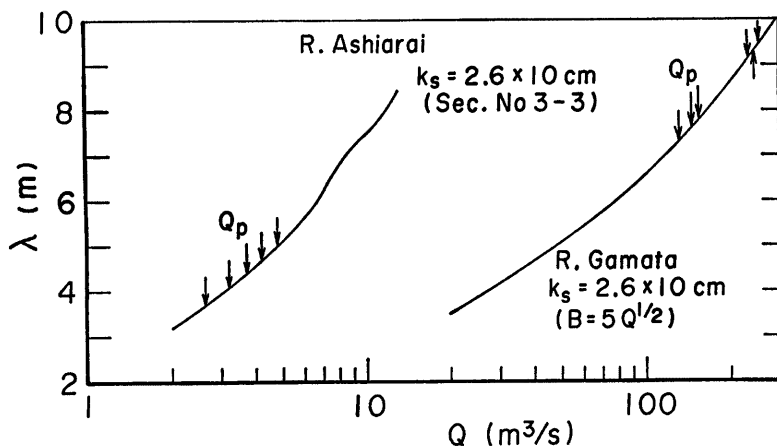


Fig. 9 The relation between wave lengths of antidunes and flow discharges in the two reaches

平均波長は、緒言で述べたように、反砂堆のそれにほぼ一致することが実験的に明らかにされている。そこで、河道における流量と反砂堆の波長を Kennedy⁶⁾ による次式、すなわち

$$Fr^2 = \frac{2 + k_* \tanh k_*}{k_* + 3k_* \tanh k_*}, \quad \left(k_* = \frac{2\pi h}{\lambda} \right) \dots\dots\dots (8)$$

によって算定した結果を Fig. 9 に示している。さらに、同図には、各出水のピーク値も示されている。ここで計算に当たっては、相当粗度 $k_s = 2.6d_{m0}$ としている。

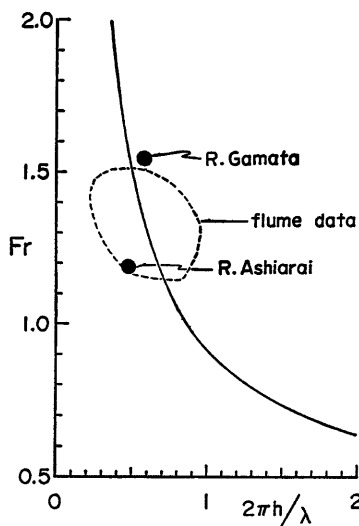


Fig. 10 Non-dimensional wave numbers of step-pool bed forms vs. Froude Number

階段状河床形の波長は、最大径が停止している条件下において、河床砂礫の移動が最も活発な時点に決定されることが考えられる。したがって、ピーク流量に対応する反砂堆の波長は、階段状河床形の波長の頻度分布と密接な関係のあることが予想される。このように考えて、 Q_p に対応する波長を Fig. 8 の中に矢印で示している。これによれば、 Q_p に対応する反砂堆の波長は、階段状河床形に関する実測値の波長の最頻値あるいは平均値の近傍にあることがわかる。また、足洗谷のデータに着目すれば、最頻値 $\lambda = 4 \sim 5\text{m}$ および平均値 $\lambda_h = 5.4\text{m}$ に対し、最大規模の出水 $Q_p = 4.8\text{m}^3/\text{s}$ における反砂堆波長の計算値は $\lambda = 5\text{m}$ であって、両者はよく対応している。したがって、階段状河床形の平均的な波長は最大規模の出水にかなりの程度依存することが推察される。

上述のことをさらに詳しく検討するため、最も規模の大きい出水を対象にし、この出水のピーク値に対応するフルード数と無次元波数との関係をみたのが Fig. 10 である。図には、式(8)および実験値の範囲も示されている。図の結果が示すように、階段状河床形の平均的な波長は、式(8)によってかなりよく推定され、しかも最大規模の出水によってほぼ決定されることがわかる。ただし、これは最大径が移動しないような出水の場合であ

って、最大径も移動するような出水では、最大径の停止限界流量によって決定されるものと思われる。

3.3 波 高

波高をステップ頂部の高さとその直下流の最低河床位との差を用いて定義し、これに基づき、二つの調査河道において測定された波高の頻度分布を示すと Fig. 11 のようである。図中 $\bar{d}_A = 0.60\text{m}$ および $\bar{d}_G = 0.74\text{m}$ は、それぞれ足洗谷および蒲田川における波高の平均値である。Fig. 11 の結果によれば、波高は、かなり広い範囲に分布しているが、波長の場合と同様、その平均値や最頻値は何らかの条件に依存することが推察される。これに関しては、すでに、先の研究において、アーマ・コートの平均粒径を用いて作られる無次元波高は、掃流力によらずほぼ一定値になることを考察している。そこで、以下、このことについて調べてみよう。

Fig. 12 は、アーマ・コートの平均粒径として Table 1 のものを採用し、 $d/d_m \sim \tau_{*m}$ 平面上に実測値を示したものである。図には、平均波高を $\leftrightarrow$ 印で示すとともに、頻度第2位と3位の波高の範囲も示されている。また、横軸の τ_{*m} の範囲は、いくつかの出水ピークに対応する無次元掃流力の変化範囲である。さらに、同図には、各流量条件のもとで得られた実験データの範囲も示されている。いま、無次元波高の平均値に着目して、これらと実験値とを比較すると、実河川のデータは実験データのほぼ上限値付近にあることがわか

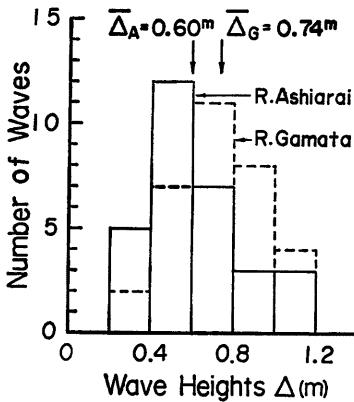


Fig. 11 Frequency distributions of wave heights of step-pool bed forms in the two reaches

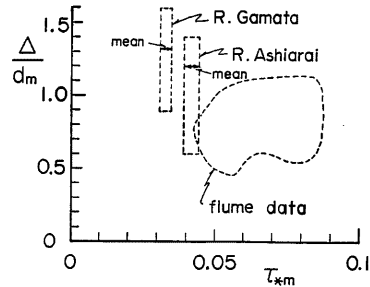


Fig. 12 Non-dimensional wave heights of step-pool bed forms vs. non-dimensional shear stresses defined by mean particle diameter of armour coat

る。このことは、次に述べるような意義をもっている。すなわち、アーマ・コートの平均粒径がどのような履歴によって決定されるのかは今後の課題であるにしても、階段状河床形の平均波高は、アーマ・コートの平均粒径程度になることが、かなり一般的に言えそうである。

3.4 出水規模の推定

以上の議論は、実際の河道にみられる階段状河床形が基礎研究の成果によってほぼ説明できることを示すものである。これはまた、形成されている階段状河床形に関する形状特性調査を行えば、これに基づいてその河床形の形成時点の出水規模をある程度推定できることを意味するものである。そこで足洗谷の支漢ヒル谷において行われた河道調査結果に基づいて、現在の流路の形成因となった洪水の出水規模に関する考察を行ってみよう。

ヒル谷^{7,8)}においては、昭和41年から現在に至るまで、土砂流出現象に関する観測が続けられている。その過程において昭和51年に流路調査が行われている。これによれば、階段状河床形に関する波長、波高の頻度分布は Fig. 13 のようであり、また、調査区間の代表的な流路横断形は Fig. 14 に示すようなものである。このような流路形状は観測調査を開始して以来、殆ど変化しておらず、最大規模の洪水を経験した昭和54年8月22日のピーク流量 $Q=1.7\text{ m}^3/\text{s}$ の出水において局所的に変化した程度である。そこで、この流路が形成された洪水の規模を把握するため、調査区間の平均河床勾配を $I_b=0.214$ とし、代表断面として Fig. 14 の結果、初期平均粒径 $d_{m0}=10\text{ cm}$ 、相当粒度 $k_s=2.6d_{m0}$ 、および Fig. 13 の結果より平均波長を $\lambda=6.1\text{ m}$ とし、これらの諸量を式(3)に適用して、波長決定時の流量を逆算すれば、

$$Q=2.2\text{ m}^3/\text{s}$$

のような結果を得る。これは、洪水期間中、最大粒径が移動しない条件のもとでは、洪水ピーク流量に対応し、出水規模がさらに大きく、その洪水によって最大径も移動するような条件を想定した場合には、洪水ピーク後の最大径の停止限界流量に対応するものと思われる。階段状河床形の形成時の流量がどちらの条件になっていたのかを知るためには、生産源やアーマ・コートの粒度分布等に関するさらに詳しい情報が必要となるが、いずれにしても、現時点におけるヒル谷流路の形成因となった洪水の最大流量は、 $2.2\text{ m}^3/\text{s}$ よりも大きなものであったことが推察される。

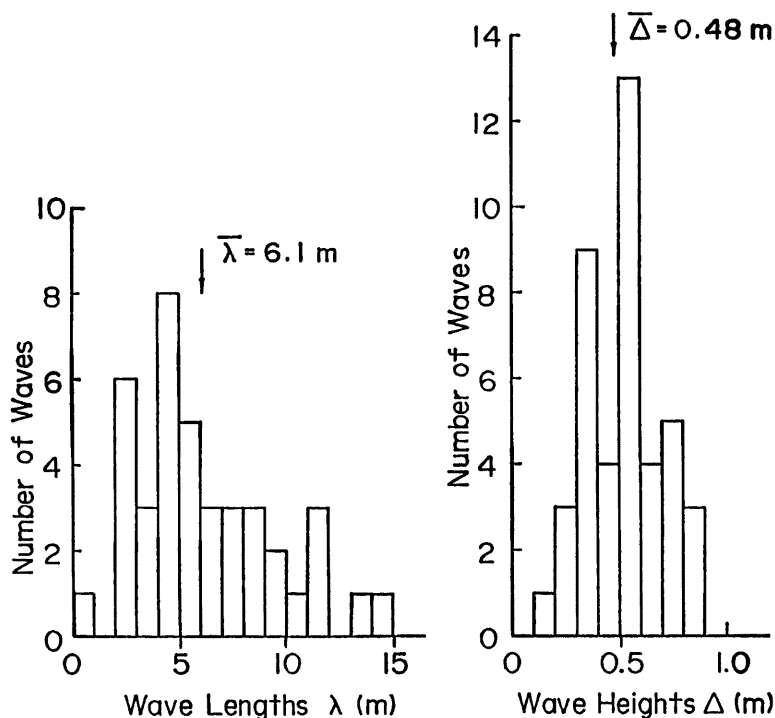


Fig. 13 Frequency distributions of wave lengths and heights surveyed at Hiru-stream, a small tributary of Ashidarai river

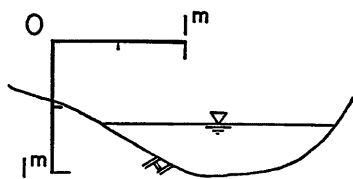


Fig. 14 A typical cross-sectional shape of Hiru-stream

4. 結 語

本研究においては、主として、階段状河床形に関する基礎研究の成果を用い、現実に存在する河床形の発生と特性値をどの程度予測できるかを検討した。さらに、これらの成果を適用して、河床形の特性値から河床形成時の出水規模を、逆に推定することを試みた。その結果、以下に示すように、興味ある多くの知見が得られた。

まず、先に提案した発生領域区分図上において、各出水のピーク流量から求められる h/d_{m0} および τ_{*m0}

を調べた結果、調査河道においては発生領域に入る出水を数多く経験していることが判明した。そこで、これらの河道には必然的に階段状河床形が形成されていることを予測し、これを河床の実測データによって確認した。ついで、波長の分布特性を示し、最大径が移動しない条件の出水においては、その平均値や最頻値は、洪水のピーク流量によって決定され、しかも反砂堆のそれに相当することを示した。波高についても、その分布特性を示すとともに、平均波高は、無次元掃流力によらず、アーマ・コートの平均粒径程度になることを示した。このように、基礎研究の成果を適用することによって、実際の山地河道にみられる階段状河床形の発生と平均的な形状特性値を矛盾なく予測できることが示された。これは、過去の出水資料あるいは降雨資料等を用いて、山地河道における階段状河床形の平均的な規模の予測ができることを意味するものであって、山地河道における流砂問題を議論していく上で、重要な知見となる。これは、また、階段状河床形の形状特性値およびアーマ・コートの粒度分布により、河床形成時の出水規模をある程度予測できることを意味するものである。そこで、河道調査結果に基づいて階段状河床形が形成された時点の洪水規模の予測を行ってみたところ、かなり合理的と思われる洪水規模の予測結果を得ている。

以上のように、本研究によって興味ある知見を得ているが、これらはかなり大胆な条件を設けて議論されていることを銘記しなければならない。たとえば、上流域からの供給土砂の問題や、階段状河床形を構成している材料がいつの時点で輸送されてきたのかについては何も考慮されていない。今後、このような問題や階段状河床形の変形や破壊等に関連する諸問題について考察を進めるとともに、階段状河床波上の土砂の挙動等について研究を進めるつもりである。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・江頭進治・安東尚美：階段状河床形の形成機構と形状特性に関する研究，第28回水理講演会論文集，1984，pp. 743-749.
- 2) 芦田和男・江頭進治・安東尚美：階段状河床形の発生機構と形状特性，京大防災研年報，第27号 B-2，1984，pp. 341-353.
- 3) 江頭進治・芦田和男・沢田豊明・西本直史：山地河道における階段状河床形の形状特性，第29回水理講演会論文集，1985，pp. 537-542.
- 4) Egiazaroff, I. V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, No. Hy 4, 1965.
- 5) Whittaker, J. F. and M. N. R. Jaeggi: Origin of Step-pool Systems in Mountain Streams, Proc ASCE, Vol. 108, No. Hy 6, 1982, pp. 758-773.
- 6) Kennedy, J. F.: The Mechanics of Dunes and Untidunes in Erodible-bed Channels, J. Fluid Mech, vol. 16, Part 4, 1963, pp. 521-544.
- 7) 沢田豊明・芦田和男・高橋 保：山地河道の変動と砂礫の流出に関する研究，第 26 回水理講演会，1982，pp. 105-110.
- 8) 芦田和男・高橋 保・奥村武信・道上正規・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出，京大防災研年報，第15号 B, 1972，pp. 349-361.