

山地河道における階段状河床形の形状特性

GEOMETRIC FEATURES OF STEP-POOL BED FORMS IN MOUNTAIN STREAMS

京都大学 防災研究所 正 江頭進治
 京都大学 防災研究所 正 芦田和男
 京都大学 防災研究所 正 沢田豊明
 京都大学 大学院 学 西本直史

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・下流側が平坦あるいはプール状を呈しているものである。河床表面には顕著なアーマ・コートが形成されている。このような特性を有する階段状河床形は、その形成・発達・破壊のプロセスを通して、また、プール部における流出土砂調節現象を通して、山地部における流砂量を支配する一つの大きな要因となっている¹⁾。図-1は、一例として、河床形の流出土砂調節機能を模式的に示したものである。この図において、河床表面全域が流送砂礫に覆われているような場合(case 1)と、プールの一部に流送砂礫が存在する場合(case 2)とでは、流量が同じであっても流出土砂量はかなり異なってくる。さらに極端な例として、case 3のように、プールに貯留土砂がなく、しかもアーマ・コートが破壊されない条件では、流出土砂量は無視できるオーダになる。こういう状態から、さらに流量が増加して、アーマ・コートの破壊が起こるような条件になると、流砂量は急激に増加する(case 4)。

上述のように、階段状河床形は、流出土砂量を支配する大きな要因になっている。したがって、山地河道における流砂現象に関する理解を深めるためには、階段状河床形の発生機構、形状特性、および土砂水理機能等に関する研究が不可欠である。著者らは、このような観点より階段状河床形の研究を行っており、これまでに、理論および水路実験を通して、その発生条件ならびに形状特性に関する次のような知見を得てきた^{2), 8)}。すなわち、階段状河床形が形成されるためには、(1) 混合砂であること、(2) 平均粒径よりも大きい砂礫が活発に移動すること、(3) 流れが射流で、しかも分級砂礫によって反砂堆が形成されることが必要である。また、形成された河床形が安定であるためには、(4) 最大径が移動しないことが必要である。また、形状特性について、波長(ステップ間隔)は反砂堆のそれにほぼ等しく、波高(ステップ高)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に位置するものであって、山地部における河床形状の実態調査の意義も含めて、上述の基礎研究の成果が、実際の山地部河道の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しようとするものである。

2. 河道調査と結果の概要

調査の対象とした河道は、神通川上流域の蒲田川およびその支川足洗谷である。これらの位置図および調査区間を図-2に示す。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、2～3 m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ながら

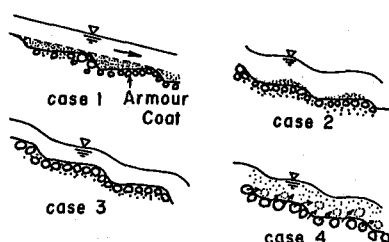


図-1 階段状河床形の土砂流出調節機能

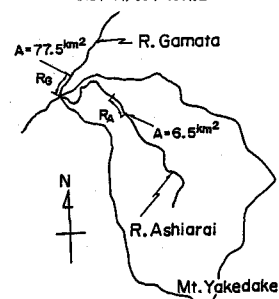


図-2 蒲田川および足洗谷の位置と調査区間

ら光波測距機を用いて測定された。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、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。

図-3および図-4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。ここで、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。図-5は、足洗谷の横断図の一例である。写真-1、2は、蒲田川および足洗谷において

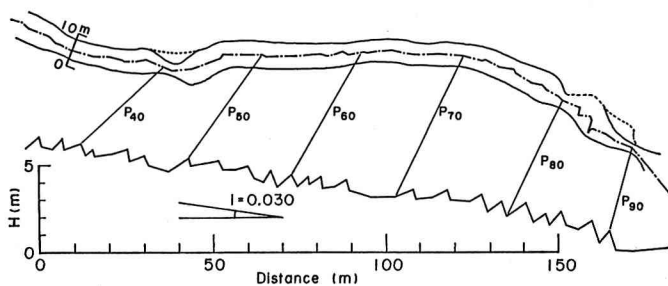


図-3 蒲田川の平面形状と縦断形状

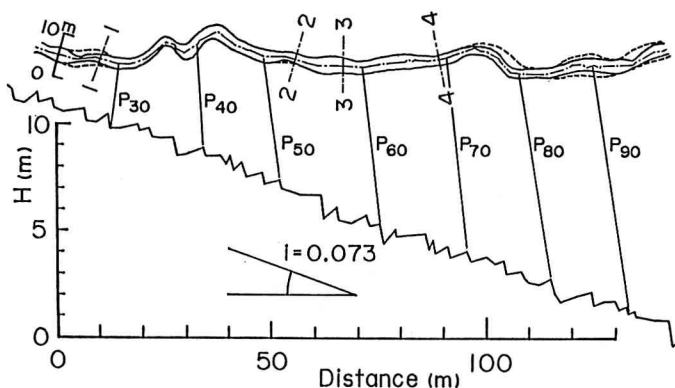


図-4 足洗谷の平面形状と縦断形状

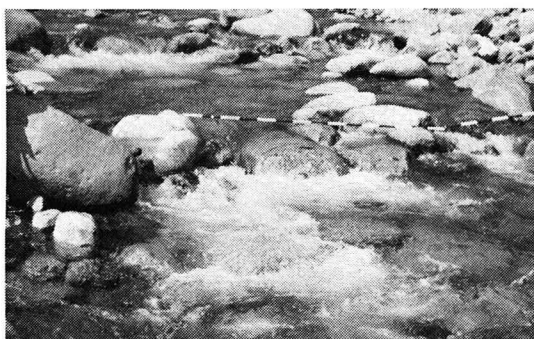


写真-1 蒲田川における階段状河床形の一例

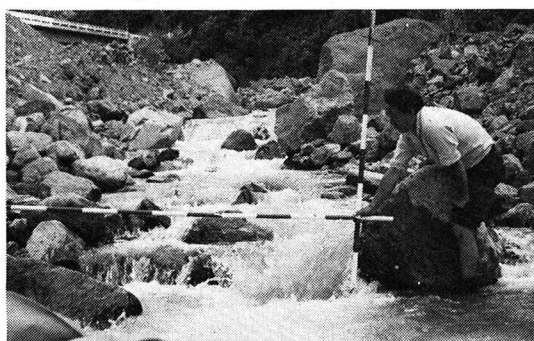


写真-2 足洗谷における階段状河床形の一例

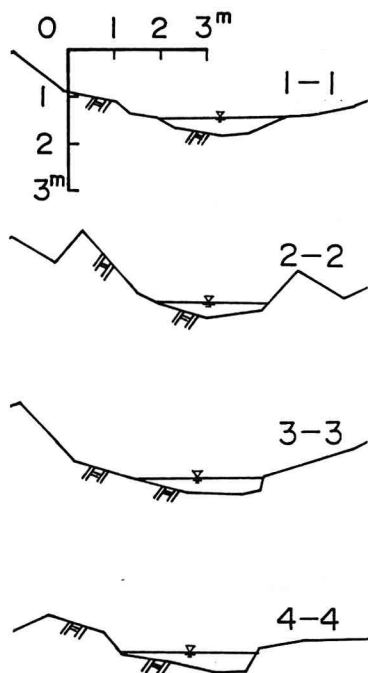


図-5 足洗谷の河道横断形状
(水理計算には断面3-3を採用)

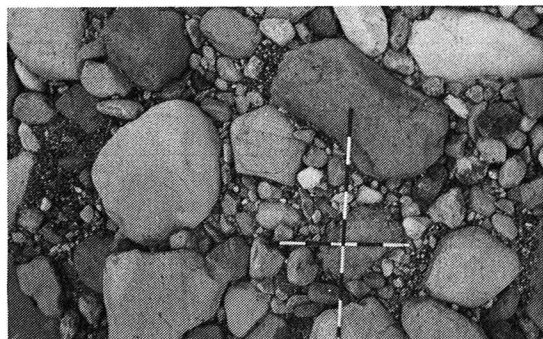


写真-8 蒲田川におけるアーマ・コートの一例

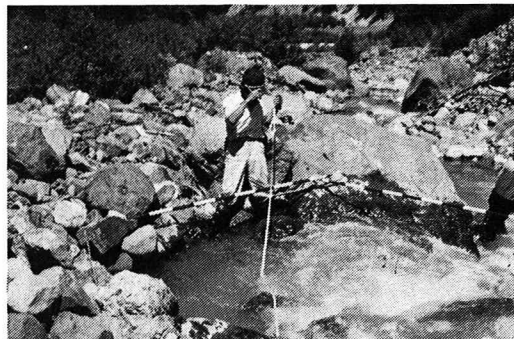


写真-4 足洗谷の河道構成材料の一例

調査時に撮影した河道の状況を示したものである。写真-3,4には、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。

以上は、調査の方法およびその結果の概要の一部であるが、巨石が横断方向へ連なってステップを構成している状況が写真-1,2に示されるとともに、これらの連続的な構造が図-2およびるから理解される。さらに、写真-3には、流水の作用下にあった河床表面におけるアーマ・コートの状況が示されている。

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、明確な情報は無いが、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、1988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、調査区間の最上流端で観測された1983年の記録より収集した。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、これらを図-6に示し、足洗谷に関しては、1983年の4月～10月の流量時系列を図-7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（図-2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、図-6の流量の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

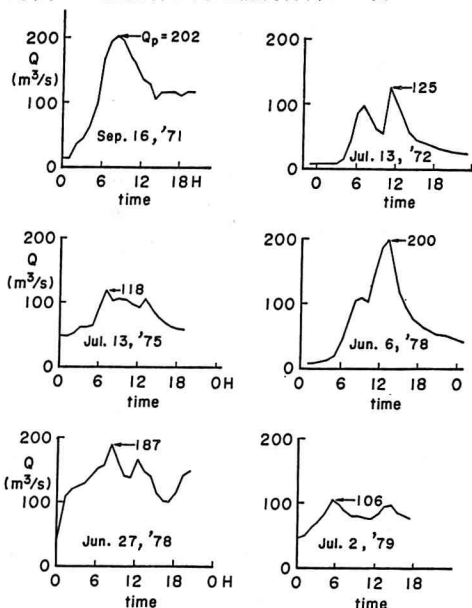


図-6 蒲田川第一測水所における出水資料

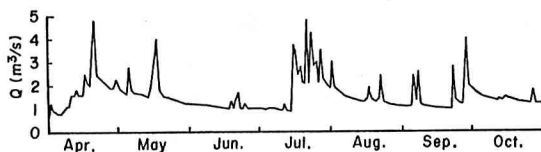


図-7 足洗谷の観測用水路における出水資料

表-1 河道の特性値

項目	流域面積 (km ²)	調査区間長 (m)	調査区間の平均河床勾配	
蒲田川	77.5	280	0.030	
足洗谷	6.5	200	0.073	
項目	生産土砂		アーマ・コート	
	平均粒径	最大粒径	平均粒径	最大粒径
蒲田川	0.1 m	1～2	0.56	1～2
足洗谷	0.1 m	1～2	0.50	1～2

量を表-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、Egiazaroff⁴⁾の式を適用して各粒径の移動限界量を求めると、表-2のようである。本表の計算に当たっては、つぎのような値が採用されている。相当粗度 k_s は、著者らの実験結果³⁾より、 $k_s = 2.6 d_{m0}$ ($d_{m0} = 10\text{cm}$: 初期平均粒径)とし、流路横断面形については、蒲田川のはレジーム則 $B = 5Q^{1/2}$ を用いて推定し、足洗谷については、図-5の断面3-8を採用している。

表-2の結果は、河床材料が、もし生産土砂で覆われており、しかも図-6および7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、緒言で述べた条件(2)は十分満たされているものと推察される。著者らは、この条件と分級砂礫による反砂堆の形成条件が同時に満たされたときに階段状河床形が形成されるものとして、その発生領域区分図を提案しているが、これらの河道において河床形が発生するのかどうかをみるため、ここで、その領域区分図へ調査データを示してみよう。その結果を図-8に示す。ここで、 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、蒲田川のデータについては、 $150\text{m}^3/\text{s}$ 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、 $3\text{m}^3/\text{s}$ 以上のピーク流量を対象として図示している。図-8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、図-6および7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伺える。

3.2 波長

前述の図-3および4に示す縦断面において、波長をステップの間隔長で定義し、その頻度分布を示すと図-9のようである。まず、蒲田川についてみれば、 $\lambda = 5 \sim 6\text{m}$ のところに最頻値があり、第2位が $6 \sim 9\text{m}$ の領域にある。平均値は $\lambda_G = 8.1\text{m}$ である。

表-2 砂礫の移動限界流量

粒 径 (cm)	10	20	40	60	80	100
蒲田川 (m^3/s)	7.0	17	58	130	242	334
足洗谷 (m^3/s)	0.2	0.5	1.5	2.7	4.5	6.6

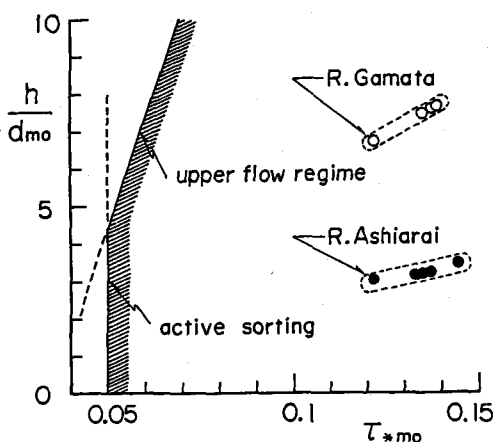


図-8 階段状河床形の発生領域

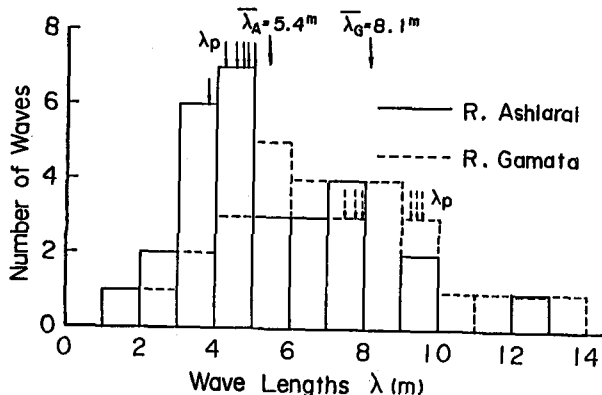


図-9 波長の頻度分布 (図中の矢印は、各出水のピーク流量に対応する波長の計算値である)

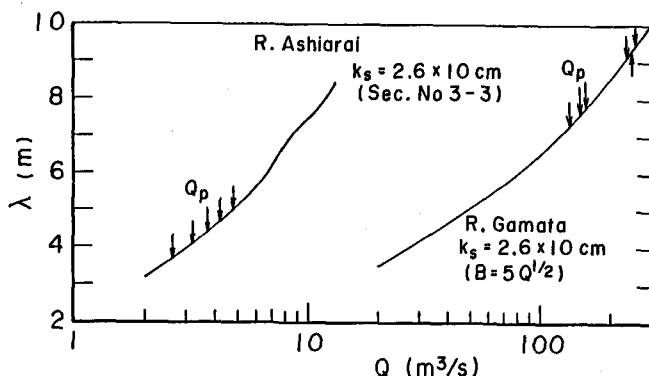


図-10 式(1)による流量と波長の関係

一方、足洗谷についてみると、最頻値は $\lambda=4\sim5\text{m}$ にあり、第2位は $\lambda=3\sim4\text{m}$ のところにある。また、平均値は $\lambda_A=5.4\text{m}$ 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、ある範囲の波長から構成されているのである。

著者らは、先の研究において、階段状河床形の波長は、河床砂礫の分級が最も活発な時期に決定され、しかも波長は反砂堆のそれに等しくなることを推察し、Kennedy⁵⁾による反砂堆の理論曲線（式(1)）と実験値とを比較して、その妥当性を検証している。ここに、理論曲線は次式のようなものである。

$$F_r^2 = \frac{2 + k_* \tanh k_*}{k_*^2 + 3 k_* \tanh k_*}, \quad (k_* = \frac{2\pi h}{\lambda}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図-10は、河道の条件と粗度 $k_s=2.6\text{d}_{m0}$ を(1)式に適用して算定される流量と波長の関係を示したものである。また、各河道における出水のピーク値も図示している。上述のことより、これらのピーク流量に対応する波長は、図-9に示す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 に対応する波長を図-9の中に矢印で示している。これによれば、 Q_p に対応する波長は、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 $\lambda=4\sim5\text{m}$ 、および平均値 $\lambda_A=5.4\text{m}$ 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。

こ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、水深および平均波長から作られる無次元波数との関係をみたのが図-11である。図には、式(1)および実験値の範囲も示されている。図の結果から伺えるように、階段状河床形の平均的な波長は、式(1)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、先の研究によれば、これは最大粒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

ステップ頂部の高さとその下流の最低河床位との差で波高を定義し、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図-12のようである。これに

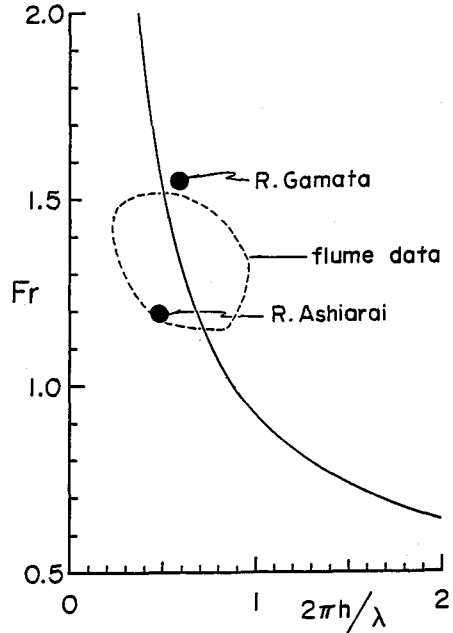


図-11 無次元波数とフルード数

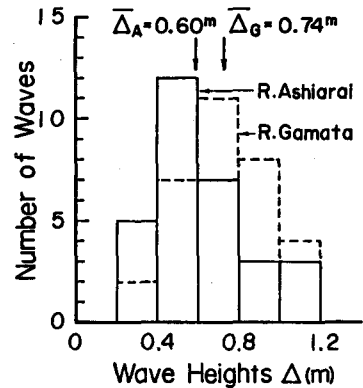


図-12 波高の頻度分布

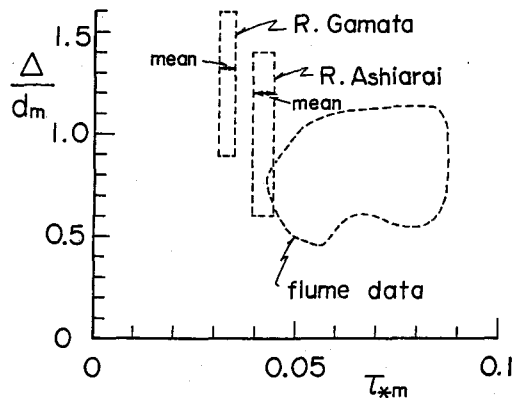


図-13 無次元波高と無次元掃流力

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が、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、以下の考察の妥当性を調べてみよう。

図-13は、アーマ・コートの平均粒径として表-1のものを採用し、 $\Delta/d_m \sim \tau_{*m}$ 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る。このことは、次に述べるように重要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。

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て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。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。

以上のように、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、重要な知見が得られたものと思われる。しかし、階段状河床形の変化や破壊等に関連する諸問題について究明すべき多くの問題も残されている。今後、こうした問題や、階段状河床形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) 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.
- 2) 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，1984，pp. 743-749.
- 3) 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，27号B-2，1984，pp. 341-353.
- 4) Egiazaroff, I. V. : Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol. 91, No. Hy 4, 1965.
- 5) Kennedy, J. F. : The Mechanics of Dunes and Untidunes in Erodible bed Channels, J. Fluid Mech., Vol. 16, Part 4, 1963, pp. 521-544.