

II-31 山地河川の流路形態に関する調査研究

一 豊平川上流部・冷水沢を例として一

北海道大学・工学部 正 員 藤田 睦博
 同 上 正 員 長谷川和義
 同 上 学生員 大貫 浩幸

1. はじめに

山地河川には、河道構成材料の粒度分布、流れの水理学特性、土砂流出現象、流路の形態とその変動特性などにおいて、一般の沖積河道には見られない特有の現象がある。最近、山地河川の流路形態について関心が高まり、形成・形状特性などに関する実験的研究が行われるようになってきた。Whittaker、Jaeggi¹⁾は山地河川に特有な階段状河床形の発生が、反砂堆の発生と分級現象に起因することを推察し、ステップ波長が反砂堆のそれに対応することを見出した。また、芦田・江頭・安東²⁾は、階段状河床にも波長の長い中規模のものと、小深程度の小規模のものが混在することを示し、小規模形状の発生条件として、①混合砂であること、②Upper Flow Regimeであること、③分級作用が活発に起こること、④最大径の礫が移動しないこと、を挙げている。しかし、山地河道の形態は多様であり、可能な限り実態に関する調査資料を蓄積する必要がある。本研究は、豊平川上流部の冷水沢の一部を観測区間に選り、縦断形状、平面形状などに関する詳細な測量を実施し、主に階段状河床形の特徴を明らかにしようとするものである。さらに、形成実験を試み、その成因について、上述の研究の追試を行うことにする。

2. 冷水沢および観測区間の概要と特徴

1) 冷水沢の概要

冷水沢は、札幌近郊の札幌岳(1293m)に源を発し、そこから北西の方向に流れ、豊平峡ダム下流約2kmの地点で豊平川と合流する、流域面積が5.2km²の山地河川である。(図-1, 図-2参照) 流域の所々には、山地河川の特徴である土石流堆積物が見られる。さらに、支流との合流点においては、小規模ながら、土石流扇状地が形成されている。しかし、全体としては、近年に土石流や大規模な河道変動が起こった形跡はなく、近隣の土石流頻発溪流に比べると、比較的小となしい性質の山地河川と見られる。

2) 観測区間の性質

観測は、豊平川合流点より、約1km上流の図-1に記入した150m区間において実施された。現地測量は、1984年9月20日～23日および10月21日、22日において、防災工学研究室所属の教員・院生・学生13名によって行われた。平面図は、平板測量によっており、縦横断面図にはオートレベルが、コンター作成にはハンドレベルが使用されている。

当該区間は、図-2に見られるように、凸状の堆積地形を呈する場所であり、事実、観測区間の左岸が大量の土石流堆積物で形成されており、この堆積物を挟んで小規模な分岐流

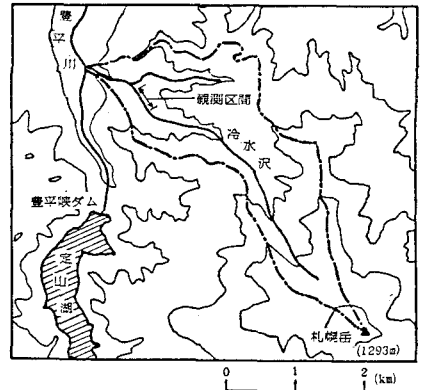


図-1 冷水沢流域図

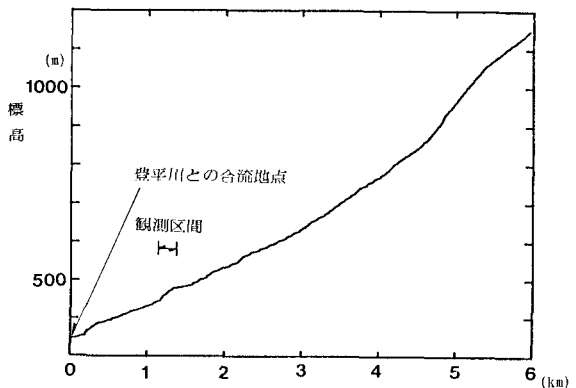


図-2 冷水沢縦断面図

が生じている。この分岐流は、観測区間の1/3程下った所（距離杭No.11）で再び本流に合流している。すなわち、上流部左岸堆積物は、大きな中洲となっており、逆に、流路は土石流堆積物上を浸食して形成されたものと思われる。観測区間の下流端から先が再び急勾配になっており、この点から考えると、観測区間全体が土石性の堆積地である可能性が強い。なお、左岸の真近にダムへ通ずる観光道路が、また右岸の近傍に札幌岳登山道がせまっており、これらの人工がおよんでいる可能性も考えられる。

図-6は観測区間のほぼ全域の平面図であり、図中、流路の左右岸に設けられた番号は、ほぼ10mごとに打たれた距離杭の番号を示す。

図中の礫は、径30cm以上のものは全てアリダードと巻尺によりプロットしてあり、これ以下のものは目測によってスケッチしている。

上述した分岐流は描かれていないが、No.11付近の流路幅の広がった部分が合流点である。これらの図からも一目で分るように、No.11より上流の部分と下流の部分とで、様々な点で性質が異なっている。図-3に示すように、平均勾配は、上流部で0.1034、下流部で0.0675となっている。これらは、Whittaker・Jaeggiが示した、明確な階段状河床形が形成されるための限界の勾配、0.075より上流側で大きく、下流側で小さいことを意味する。確かに、限界勾配を上まわる上流部は、下流部よりも階段波形（ステップ）が大きく、明確である。図-5は、上流部と下流部の典型的な横断形状例を挙げたものである。距離杭5L-5Rを結ぶ下流域横断形状は、緩やかなU字形を示し、水深が小さいのに対し、上流域の13L-13Rの横断形状は、V字形を呈し、水深が大きく、構成礫も大きい。

図-6 観測区間の平面図

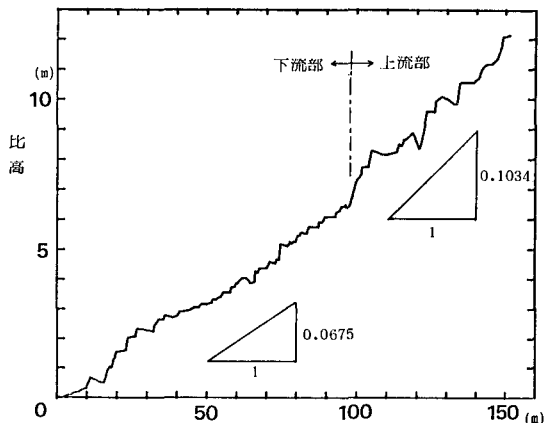
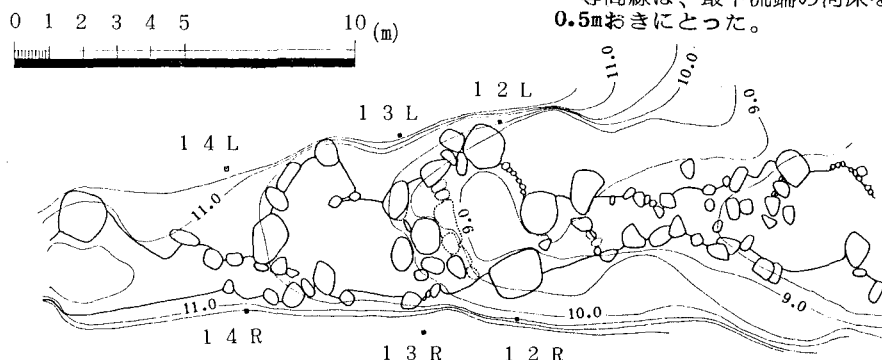


図-3 観測区間縦断面図

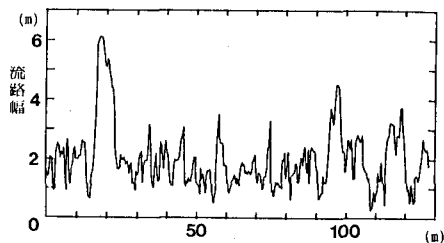


図-4 観測区間における流路幅の変化

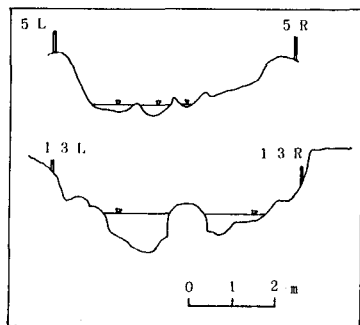
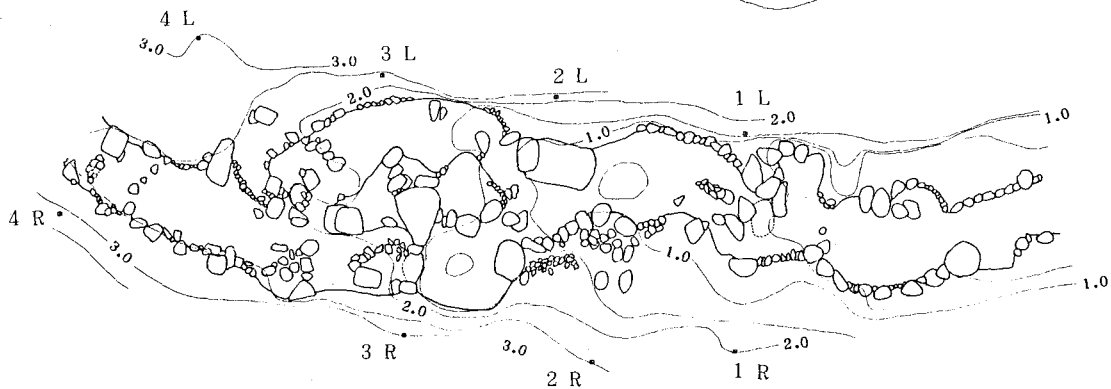
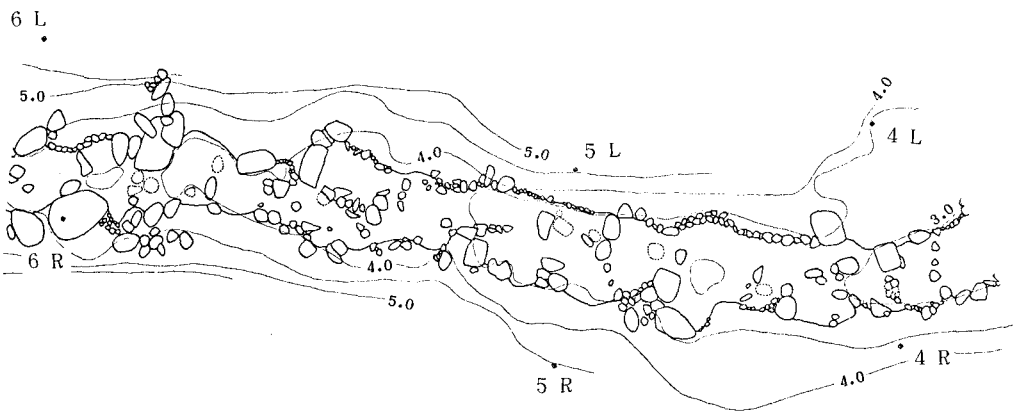
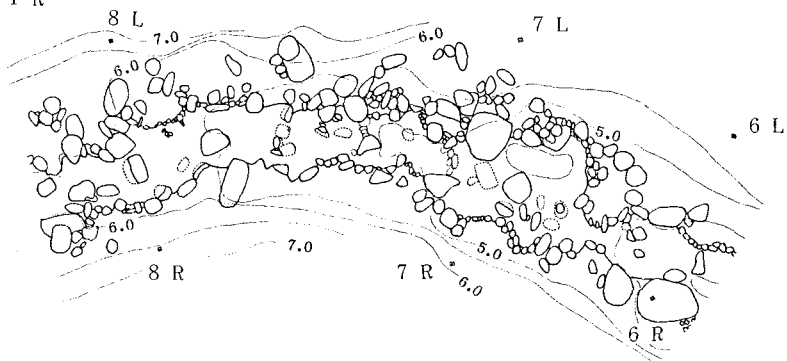
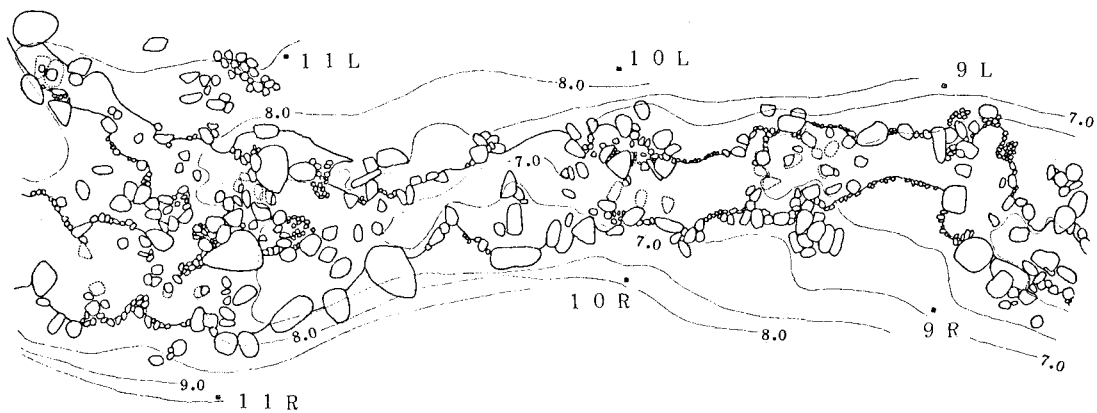
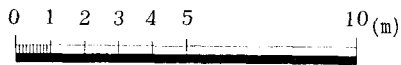


図-5 観測区間内の横断形状例

等高線は、最下流端の河床を基準とし、0.5mおきにとった。



3. ステップ構造と形状特性

1) 波長と波高

階段波形は、観測区間のNo.11の上流部で10個、下流部で33個確認されており、上流部の平均波長および波高はそれぞれ、5.51m、0.56mである。これに対して、下流部はそれぞれ、2.66m、0.20mである。図-7,8は、これらのステップ波長と波高を長さごとに区分し、その度数分布を示したものである。上流部は個数が不足していて、明確な性質が現われていないが、下流部資料で判断する限り、波長・波高ともにガンマ分布、ないしは対数正規分布に従うように思われる。

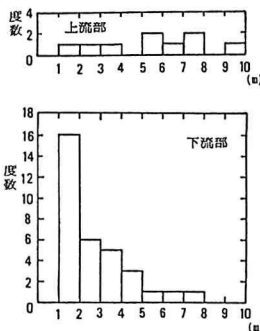


図-7 ステップ波長の頻度分布図

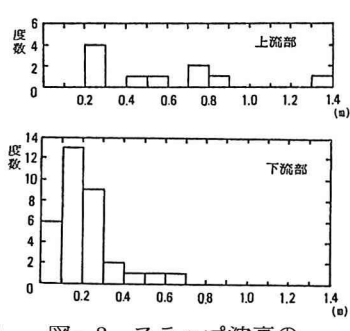


図-8 ステップ波高の頻度分布図

2) 縦断形状

図-9は、観測区間で見られる典型的なステップの縦断形状の例を2つ挙げたものである。(a)のような小滝と滝壺からなるステップとプールは、主に上流部で見られ、(b)のような単なる段落ちのステップは、下流部の特にNo.4～No.6で見られる。両者の違いがそもそも成因の違いに根ざすものか否かは、にわかに判断できないが、Whittakerらの規準によれば、上流部の(a)のタイプは大礫のかみ合いと分級作用に基づく階段構造であり、下流部の(b)は反砂堆が成因となる階段構造ということになる。また、波長・波高の大きさから考えて、(a)が芦田・江頭らの主張している中規模階段状河床、(b)が小規模階段状河床である可能性もある。これらの検討は、後章でもおこなうが、分類の指標が必要なように思われる。

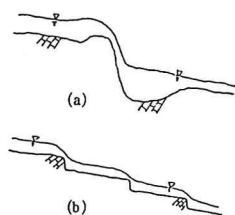


図-9 ステップ縦断形状の典型的例

3) 平面形状

図-6の平面図を観察すると、No.4～No.6に見られるようにステップの連続が、川幅の広狭に対応していることがわかる。さらに、ステップの主構成礫が流路の両側に1つずつ2個配置されていて、流れが

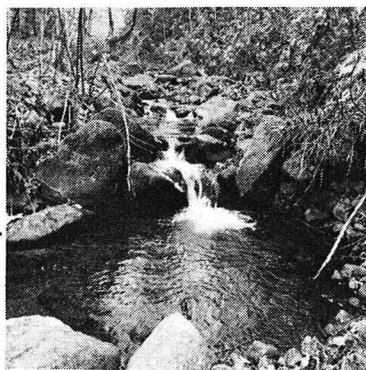


写真-1 (a)のタイプのステップ

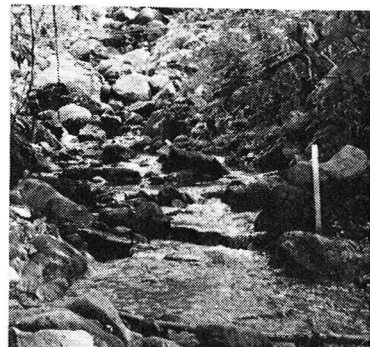


写真-2 (b)のタイプのステップ

狭められている箇所と、流路の中央に1個配置されていて、流れが分岐している箇所があり、これらが交互につながっていることがわかる。これを模式的に描くと、図-10のようであり、観測区間の随所にこのような例が認められる。このような平面形状の特徴は、ステップ形成時に発生する衝撃波によるものと予想されるが、後章において検討する。

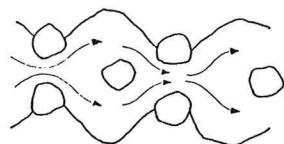


図-10 ステップ平面形状の典型的例

4. 粒径分布の特徴

粒径分布を求めるための砂礫粒子の採取方法は、本来ならば、平面採取法により、一定の面積の河床表面に露出した全粒子を採取するのが望ましいのであるが、能率を考慮し、河村・小沢³⁾によって精度の良さが確認された線格子法(Line Grid Method)を用いることにした。観測区間の最下流端よ

り、流路中央、左岸、右岸にそれぞれ巻尺を張り、1mおきにその地点直下の礫を任意に採取し、1個の礫についてそれぞれ三軸長(長軸,中軸,短軸)を測定した。流路中央で145個、左岸で144個、右岸で145個を採取した。中軸径によって、粒子の大きさは代表されるので、それを粒径として粒度分布を表わしたのが図-11である。いずれも、対数正規分布に従うことは明らかである。一方、図-12は同じ試料を重量

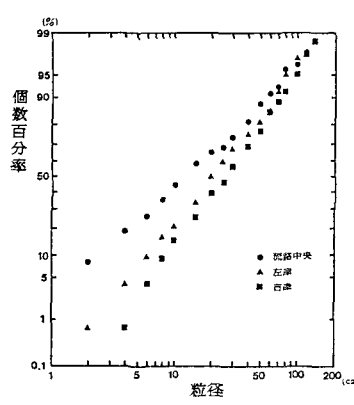


図-11 観測区間の粒度分布

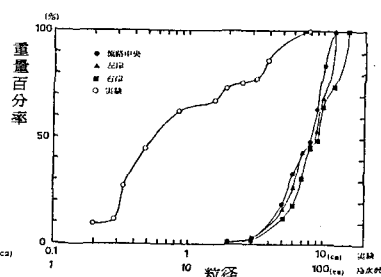


図-12 実験及び冷水沢の粒径加積曲線

百分率で表わしたものである。巨礫のウエイトが影響して、粒径の大きな礫の割合が大きくなっている。

5. 実験との対比による成因の考察

1) 実験の目的と方法

冷水沢観測の結果、①河床勾配の異なる2域で異形態の階段状河床形が認められる、②流路幅の広狭をともなう狭さく部と分岐部の連続する階段状河床形態が広く存在する、という興味ある知見を得た。ここでは、現地と同様な中折れの河床勾配のもとでのステップ発生実験を行い、異形態の発生に関する検討を行う。また、②の形成原因につき観察と考察を行うことにする。

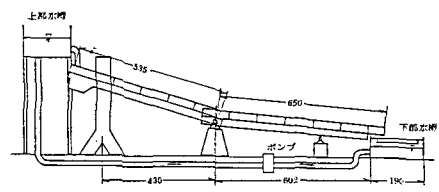


図-13 実験装置

使用水路は、図-13に示すような、上部長5.35m、下部長6.50mの中折れ式水路であり、幅20cm(上部)、22cm(下部)で下部の左岸側壁が、アクリルガラスより成っている。

ステップの発生にとって、河床材料は最も重要なファクターと思われたが、十分な吟味はなされなかった。使用砂の粒度分布を図-12中に示す。

一連の実験は、砂を厚さ7cmに敷きつめ、給砂なしの条件で行われた。流量条件が不明なので、3~8(l/sec)の範囲で数種類に変えて流すことにした。通水後、適当な時間間隔で側面写真を撮り、これの読みとりによって平均水深を得るとともに、平均流速を算定した。ステップ波長は、停水後にスケッチを行いながら測定し、平均を求めている。表-1に、実験条件と主要水理量を示す。

表-1 実験条件及び結果

	上部勾配 I_u	下部勾配 I_l	流量 $Q(l/sec)$	平均水深 $H(cm)$	平均流速 $V(m/sec)$	ステップ平均波長 $\lambda(cm)$	フルード数 Fr
Run-3	0.100	0.100	5.0	3.49	0.714	18	1.221
Run-4	0.100	0.100	4.0	2.54	0.787	21	1.577
Run-5	0.1034	0.0675	6.0	3.45	0.870	23	1.496
Run-6	0.1034	0.0675	4.0	2.64	0.757	24	1.488
Run-7	0.1034	0.0675	8.0	3.82	1.048	25	1.713

2) 勾配変化の影響

一連の実験のうち、Run-5,6,7は、冷水沢試験地と同様な勾配条件を与えている。結論から述べるとこれら3つの実験のいずれにおいても、上・下水路に生じた河床形にきわだった違いが見い出せなかつ

た。いま、Run-5 を例にとると、通水後10数秒において、写真-3のような反砂堆性の河床波が発生する。同時に、すみやかにアーミングが進行し、河床波面上を移動するのが礫のみとなり、礫のなみ合いを見せる。しかし、大礫の存在しない部分はやがて平滑化され、流送礫をおしとどめるだけの大礫が存在する場所や、かみ合い抵抗の大きい場所がステップとして存続するようになる。これらの現象は上・下水路であり変わらないが、上部の現象が遠く、しかも給砂なしの影響が上流端から及んで、上部水路の前半で礫分のぬけ出しが顕著に見られた。写真-4は、上部水路後半部に発生したステップである。波長が約30cmと、下部水路における平均、23cmよりやや長いものの、基本形態は変わらない。むしろ、大礫が2個、1個と並ぶ典型的な図-10の形をしている。

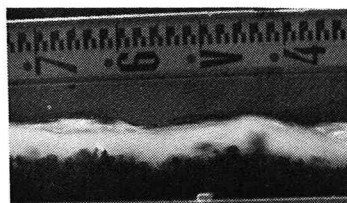


写真-3 Run-5
の側方からの写真

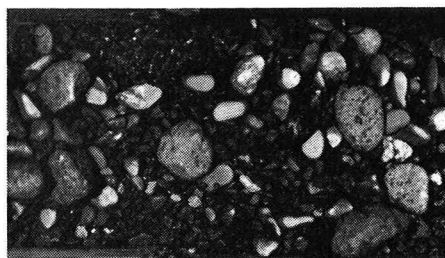


写真-4 Run-5 の上方からの写真

以上のように、河床材料が同一であれば、勾配の違いのみでは階段河床形の違いが現われないようであり、巨礫の存在が重要な要因として介在しているように思われる。

3) ステップ形成因と波長に関する考察

実験的に見い出されたステップの形成原因を調べるために、林⁴⁾による反砂堆の領域区分との対照を行った。紙面の都合で図は省略するが、得られたステップ波長と水理量はほとんど発生領域内に入る。したがって、この種のステップ、およびこれと類似の形態をもつ冷水沢下流域のステップは、反砂堆性のものであることが確認できる。

写真-4のようなステップ形成時に、水面の衝撃波が図-14に模式化するような形で生じていることが認められる。ただし、段の成長とともに跳水を起し始めるなど、実現象は複雑であり、これらのモードが常に妥当とは限らない。今、ステップ形成時にこのような波面が生じ、これが礫のかみ合いに関与するものと仮定する。ただし、図の斜線の礫のように λ_1 のN倍の位置にステップを構成することも考えられる。マッハ角 β は概略 $\sin \beta = \frac{1}{Fr}$

に従う。また、ステップが反砂堆性であれば、

$$Fr^2 = \frac{coth kH}{kH} \quad (k = \frac{2\pi}{\lambda})$$

の線上に集まることが、林の実験値との比較図からわかる。

図-14の幾何的關係と以上の2式から、

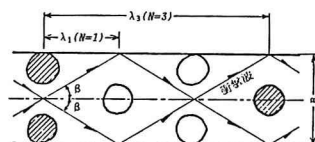


図-14

$$\frac{B}{H} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{8\pi\lambda/H}{coth \frac{2\pi}{\lambda/H} - \frac{2\pi}{\lambda/H}}}$$

を得る。

図-15は、これらの関係を $N=1, 3, 5$ として描いたものであり、描点、は、今回の実験値および冷水沢試験地のものである。ただし、試験地No.4~No.6におけるステップ波長、川幅の平均値を用い、水深は、ステップ構成礫の平均径(36cm)の移動限界水深(40cm)を用いている。図によれば、データは $N=3, 5$ の線の近傍にあり、前述の仮定が否定もできないが、必ずしも必然ではないことを示している。今後、データを増して検討を続けたい。

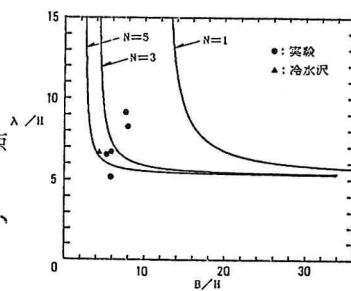


図-15

参考文献

- 1) Whittaker, Jaeggi: Origin of Step-Pool Systems in Mountain Streams, ASCE, Vol. 108, No. HY6, 1982
- 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回水理講演会論文集, 1984年2月
- 3) 河村三郎, 小沢功一: 山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布, JSCE, Dec, 1970
- 4) Hayashi, T.: Formation of Dunes and Antidunes in Open Channels, ASCE, Vol. 96, HY2, 1970