

II-32 山地河川の流れの抵抗則に関する研究

北海道大学・工学部 正員 長谷川和義
 司 上 正員 藤田 睦博
 上 学生員 大島 久生

1. はじめに

我国の河川は、その地形上 急勾配で大粒径河床をもつ山地河川の占める割合が大きい。にもかかわらず、沖積河川の研究に比べ、山地河川の研究、特に水理学的視野に基づく研究は、進んでいるとは言いがたい。しかし、最近、流出解析の進展に伴い、山腹斜面における流出現象の解析が進み、それら流出水の輸送路たる山地河川における流れの解明が強く要求されるようになってきた。この面からも、信頼しうる抵抗則の確立が急がれている。しかし、山地河道に関する抵抗則は、巨礫が多い上、河床形状の複雑さゆえ、一般の開水路や沖積河川のものとはかなり形を異にする。つまり、山地河道は、ステップとプールが交互に現われる階段状河床を呈する事が多く、段落ち、急縮急拡が組み合わさって、流れが局所的に様々に変化するため、本来不等流、局所流としての性格が強い。しかし、その河床形状の特徴に規則性を見出し、それらによって規定される代表長に関する平均流速を等流とみなして、幾つかのパラメーターによって、それらを普遍表示する事ができれば、大変好都合である。

現在、開水路の抵抗則には、対数則が良く用いられ、多くの研究者によって礫床河川への適用に努力が注がれている。しかし、相対水深の小さい領域 ($H/k_s < 2$ ただし H : 平均水深 k_s : 粗度高) では対数則の適用はもはや困難となる。この様な領域における山地河川の抵抗則に関する研究は、*Bathurst*¹⁾ の報告したものがあり、又、実験を試みたものに *Bathurst*²⁾ のものがある。各々興味深い結果が示されているが、いずれも、ステップ・プールの存在しない場合が扱われており、多くの山地河川の適用には検討を加える必要がある。本論文は、豊平川上流部冷水沢における河道形態を参考に作製したステップ・プール河床の模型水路によって実験を行ない、山地河道流れの性質を明らかにするとともに、抵抗則解明の一助を得ようとするものである。特に一度形成されたステップ上を、異なる水位の流れが生ずるときに、どの様な流れの変化をとげ、いかに抵抗が変わるかに注目している。

2. 山地河道の特徴とモデル化

2-1 冷水沢における特徴

実際の山地河道の特徴を把握するために、試験地として豊平川上流冷水沢の一部区間約150mを選び、平面、縦断横断測量、及び流速測定を行なった。測量結果の詳細は文献(3)に示す通りであるが冷水沢は典型的なステップ・プールを形成しており、以下の特徴が見られた。すなわち、一つのプールから次のプールへ落差をもって落ち込むステップ部分での水流に2通りのタイプがあり、一つは兩岸に礫群が存在し、中央の狭さく部を通じて落ち込むタイプで、他方は、流路中央に礫群が堆積していて、水流が、ここで分岐されて落ち込むタイプである。冷水沢ではこれらが交互に連なっているように見える。ただし、測定区間内では、上下流部で異なった様相を示しており、各々の勾配、ステップ波長は、表1に示すとおりである。なお流速測定は塩分流下法により求めた。

2-2 成因に関する実験

冷水沢で見られた様なステップ・アンド・プールがいかなる原因で形成されたかを見る目的で、又、それらの相似性に検討を加え、山地河道モデルの参考とするために、移動床実験を行なった。図1の様な中折れの可能な幅 20、及び 22cm、上流部 5m 下流部 6m の水路を用い、勾配を試験地と同じく上流部 0.10 下流部 0.06 にとり、流量を 8種に変え、ステップの明瞭に発生したものを選んで、その波長を測定した。これらの結果の平均を表2に示す。

文献(3)に詳しく述べている様に、ステップの形成は、従来の主張どうり反砂堆の形成と密接に関連しているようであり、本実験におけるステップ形成水理量は全て反砂堆の形成領域内にあった。このことは、流れと河床波形がフルード数によって強く支配されていることを物語っている。

表1 冷水沢実測値その1(m)

	勾配	ステップ 波長	D_{84}
上流	0.1034	5.51	0.50
下流	0.0675	2.66	

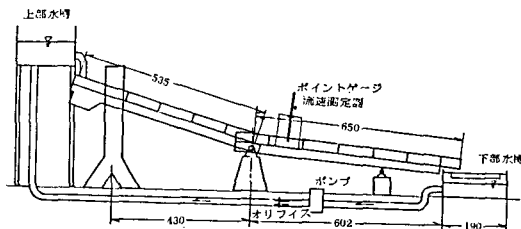


図1 実験装置

表3 冷水沢実測値 その2

Point No.	水深 (m)	径深 (m)	川幅 (m)	$Fr = 0.165$ $n = 0.234$	
4	0.400	0.180	2.06	流速 (m/sec)	λ
5	0.275	0.130	1.60		
6	0.363	0.120	2.84	0.304	0.07574
平均値	0.346	0.143	2.17		

表2 実験値 (cm)

勾配	ステップ 波長	D_{84}
0.100	19.5	2.5
0.0675	24.0	

表4 実験条件 及び 結果

Run	勾配 I	流量 Q (l/sec)	水深 H (cm)	径深 R (cm)	流速 V (cm/sec)	フルード数 Fr	マンニング 粗度係数 n	$\frac{V}{\sqrt{gRI}}$
1	0.10	0.85	2.14	1.68	20.95	0.458	0.099	1.633
2	0.10	1.76	2.91	2.07	28.82	0.540	0.083	2.023
3	0.10	7.84	4.09	2.64	86.52	1.367	0.032	5.379
4	0.10	13.57	6.32	3.69	96.71	1.228	0.036	5.086
5	0.06	0.64	2.35	1.78	14.02	0.292	0.112	1.370
6	0.06	1.47	3.50	2.39	20.55	0.351	0.099	1.734
7	0.06	4.57	5.16	3.16	39.97	0.562	0.062	2.932
8	0.06	9.91	5.69	3.40	78.54	1.052	0.033	5.555

2-3 実験河床の設定

前節までの知見をもとに、山地河道を模した河床形を前述の水路上に次の様に設置した。すなわち、河床の基本形態をステップ・アンド・プールとし、ステップの径深を 7cm に選び、ステップ波長を 25cm にとり、狭さく部タイプと分岐タイプが交互になるように礫を2個1個2個1個...と設置し、流水の段落ち高さを2~3 cm とする。自然に近い状態を考え礫は様々な形状のものをを用い、径が不足する場合には数個重ねた。礫と礫の間のプール部には径 1cm 程度の小角礫をしきつめ固定した。これらの固定にはセメントモルタルが用いられた。形態の概略は図2、写真に見られるごとくである。

3. 実験条件と方法及び結果

3-1 実験条件

ステップ形成水量を参考に、平均河床勾配を $I=0.10$ 、 $I=0.06$ の2通りにとり、流量を平均水深が約 3cm, 4cm, 6cm, 8cm となるように定めた。詳細は表4のとおりである。

3-2 実験方法

上流端より約 7m にある2個のステップを観測区間にとり、図2に示す5断面の位置において測定を行った。全断面につき水深横断分布を、Sec2 を除く4断面について流速分布を測定した。水深分布はポイントゲージで水面高及び水路床高を、横断方向に 1cm 刻みで読みとり、求めた。流速分布は、横断方向に 2cm 刻み、水深方向に 1cm 刻みに測ることとし、最大流速が 100cm/sec 以下の流れについては 3mm 径プロペラ流速計、それを越える流れについては 20mm 径プロペラ流速計を用いた。流量はオリフィスのマノメーター差圧から、予備実験で得られた流量-差圧曲線より求めた。又、水面形を見るために、側面（アクリルガラス製）から写真撮影を行なうたことにした。

3-3 実験結果

表4に主な実験結果を示す。表中の水深及び径深は5断面で得られた各々の値の算術平均であり、平均流速は流量を各断面積の算術平均で除した値である。表3には冷水沢試験地の No.4-6 区間で得られた

流速結果等を示す。縮尺を 1/10 にとって考えると、Run5 がほぼ試験地における観測時の水流状態に対応するものと言える。表から明らかな様に、両者のフルード数は大体等しい。このことは、もはやステップが抵抗として働かない少流量時においても相似性が保たれる可能性を示唆するものであり、非常に興味深いことがらである。

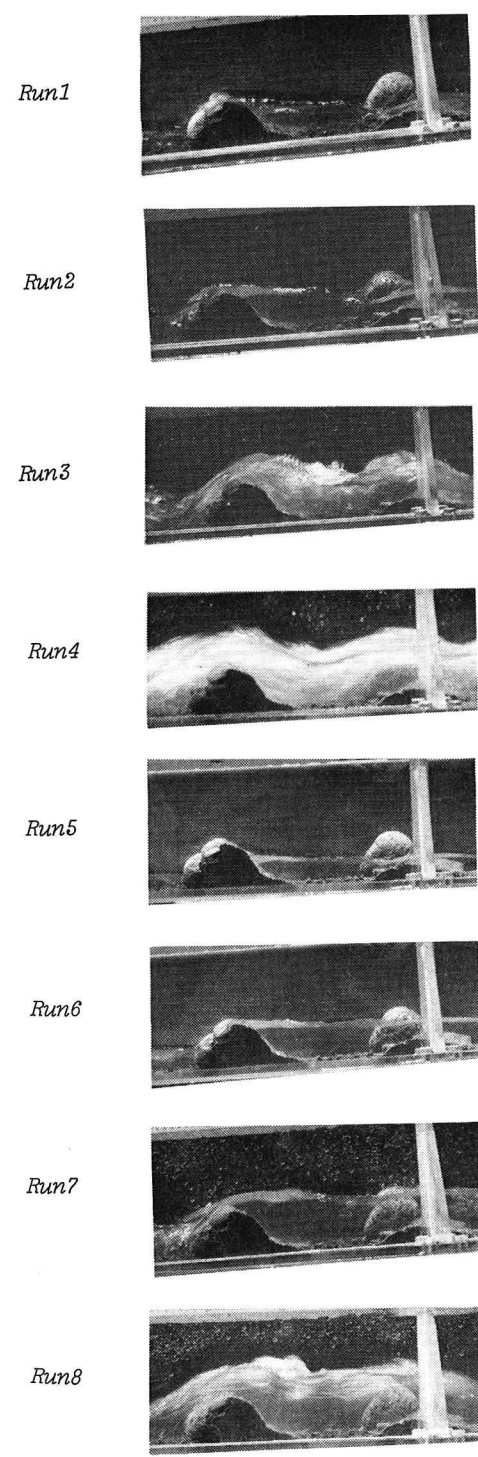


写真 水面形状

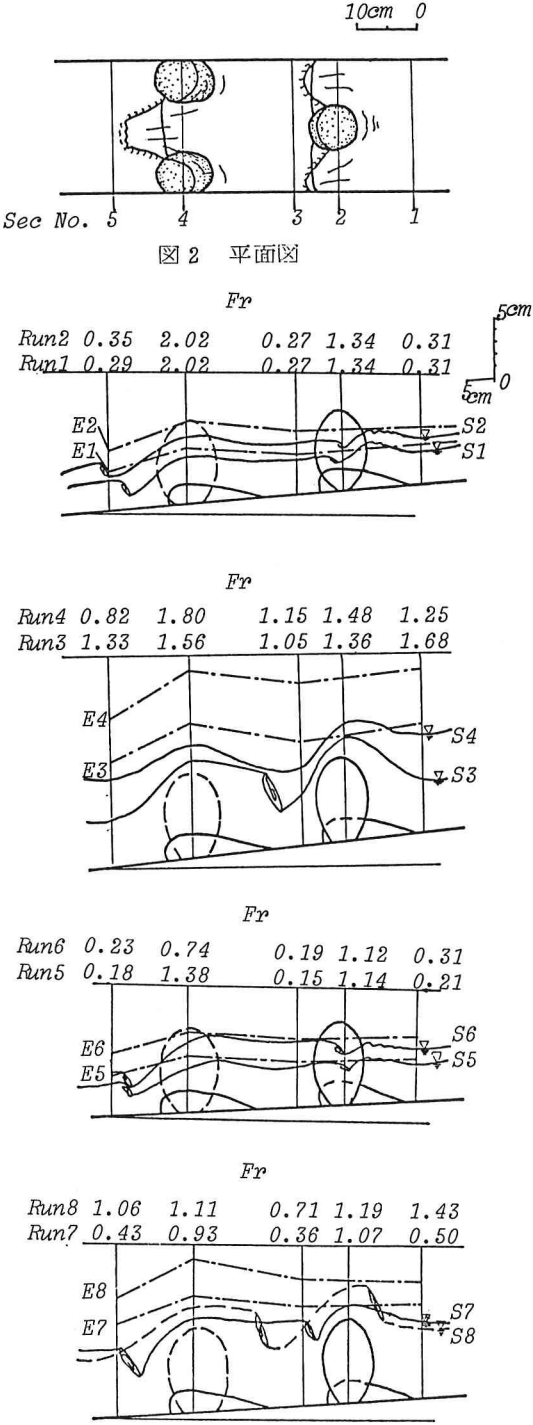


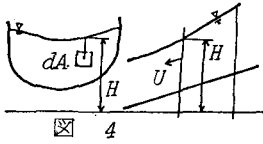
図 3 横断面図とフルード数Fr

表 5 水面形と損失エネルギー

Run	Sec 4 (3→5)			Sec 2 (1→3)		
	水面形	η	$\xi(\times 10^2)$	水面形	η	$\xi(\times 10^2)$
1	A	16.05	11.41	A	7.65	8.56
2	A	8.30	11.16	A	3.96	8.38
3	B	0.80	9.66	C	0.64	1.22
4	C	0.73	11.03	C	0.61	1.46
5	A	23.98	7.64	A	11.14	5.59
6	A	10.99	7.52	A	4.08	4.40
7	A	3.23	8.37	A	0.92	3.73
8	B	0.77	7.67	B	0.09	1.47

$$\eta = \Delta E / (V^2 / 2g)$$

$$\xi = \Delta E / \Delta x$$



各実験の流れの状態と水面形は図2、図3、及び写真にあげるごとくである。図2は Run2 の平面図であり、ステップで各々跳水が発生している。図3の実線、破線は各々異なる流量時の中央に沿ってみた水面形を、一点鎖線はエネルギー線を、上方の数値は各断面におけるフルード数を示している。Sec2 での流速測定を省略したため、この断面におけるエネルギー高は不明であり、この間を直線で結んである。

Sec3-5 間でエネルギーが上昇している様にみえるのは、水面の激しい乱れにより、水面高の測定が困難となり、圧力水頭にかかなりの誤差が含まれたためと考えられる。なお、エネルギーの算定は図4の様に諸量を取り、式式に

$$E = \frac{1}{\rho g Q} \int \left(\frac{1}{2} \rho U^3 + \rho g H U \right) dA = \frac{1}{2gQ} \left[U^3 \Delta A + \frac{1}{Q} \int U H \Delta A \right]$$

8種類の実験を通じて、水面形は下記の3パターンに分けられた。すなわち図3、写真に見られる様に、

- A : ステップ構成礫の上流部が常流状態で、ステップ部で急縮し、限界水深が上昇する一方で、水面が下降するタイプ。このため、この場所で一時的に射流に移り、ステップ下流で常流に戻るのに際し跳水をひき起こす。この場合の跳水は下流にステップがなくても起こる。
- B : ステップ構成礫の上流部が、射流状態で接近するが、ステップ上流でせき上がり、限界水深を上まわるため跳水が起こり、ステップ通過時にAと同様の理由で射流に移るタイプ。このタイプのステップ下流で起こる跳水は、さらに下流のステップの影響を受けて生じるから、下流にステップが存在しなければ、跳水は起らず、射流のままである。
- C : ステップの上下流を通じて、全て射流状態にあるタイプで、跳水は起こらない。

Sec1-3 間(ステップ礫1個の分岐型ステップ)及び Sec3-5間(ステップ礫2個の狭さく型ステップ)における水面形のパターン分類、及びこの間の損失エネルギー勾配 ($\xi = \Delta E / \Delta x$)、損失係数 ($\eta = \Delta E / (V^2 / 2g)$) をまとめて表5にあげる。 ξ についてみると、いずれのケースでも Sec2 における値よりも Sec4 における値が大きくなっている。しかし水面形がタイプAからタイプAへ続くケースではその差が小さく、タイプBからタイプB、タイプCからタイプB、及びタイプCからタイプCに続くケースでは、その差が大きい。後三者は2つのステップで構成される代表区間の損失の大部分を Sec4 で受けもつことになる。換言すれば Sec4 では流れの状態にかかわらず、エネルギー損失の絶対値にさほど大きな差異が認められないのに対し、Sec2 ではタイプAに対しタイプB、タイプCの損失が少なくなる傾向にある。

η については、同一勾配では水深が大きいほど小さな値を示す。これらを急縮急拡による損失係数の理論値と比較してみると、水深の大きな Run3, 4, 7, 8 の値は、理論によって通常得られる値にはほぼ一致するが、水深の小さい Run1, 2, 5, 6 の値は、それらをかなり上まわる。従って礫が水面下に没する

Run3, 4, 7, 8 等のエネルギー損失機構は、急縮急拡、段落ち、及び跳水現象により説明のつくものであるが、礫の一部が水面上に出ている Run1, 2, 5, 6 等は、例えば、水流のプールへの滝状落下による乱れが考えられる。

図4は、ステップ礫下流の Sec3 (分岐部の流れ) 及び Sec5 (狭さく部の流れ) における流速分布を Run4 Run7 を例として詳しく見たものである。Run4 はタイプC、Run7 はタイプAに属するが、タイプBのス

テップ下流部がタイプCのそれと類似した流況を呈するので、これらの図によって全タイプの流速分布が推察できる。Run7は両図とも、水面近傍の流速が著しく減少し、一部逆流が生じている。これは跳水の影響で、分布の歪みから、エネルギー減殺が大きいものと予想される。跳水を伴わないRun4におけるSec4での変化は、加速減速が主体で、これよりエネルギーが損失されているように思える。この流れでは、写真に見られる様に、激しい空気連行も損失の一要因のようである。

4. 流れの抵抗則

4-1 べき乗則による検討

表3に諸測定値から求めたマンニング粗度係数をあげた。見たとおり、これらは一般に用いられる値よりかなり大きく、かつ一定値を示さない。しかし、試験地での結果に比べれば、はるかに小さく、粗度の相似則に従っているようにみえる。すなわち縮尺 $1/10$ の場合のマンニング粗度係数の縮率は $(1/10)^{1/6} = 0.68$ であり、 $n_m/n_p = 0.48$ に近い値を示す。しかし、 n の大きさからいってもマンニング則の適用には無理があり、実際、実験結果は図6,7に示すように、 R, I に関して全く異なるべき乗をとる。これらの図から求め

$$V = \frac{1}{n} R^{2.24} I^{1.75}$$

た実験式は、右式のようにになる。

しかし、係数に次元が含まれるこのタイプの式は、相似性に伴う問題がついてまわり、本来、望ましいものではない。

4-2 Bathurst 式の適用性

大粗度上の流れを、無次元パラメーターと係数によって、表わした式は多くない。Judd-Peterson⁴⁾は、野外データを

を用いた流速係数 $\sqrt{8/f}$ (f : 摩擦係数) を、幅一水深比 $=B/H$ 水深一粒径比 $=H/D_{94}$ 、ならびに粗度占有率 $=\lambda = \sum_{i=1}^m A_{Fi}/A_B$ (A_{Fi} : 1つの粗度要素の横断面内の水中面積、 m : 代表区間の要素数 A_B : 代表区間の路床面積) の関数とし示した。Bathurst

は、これに考察を加え、Tees 川への適用をはかつて、次頁のような抵抗式を導いた。

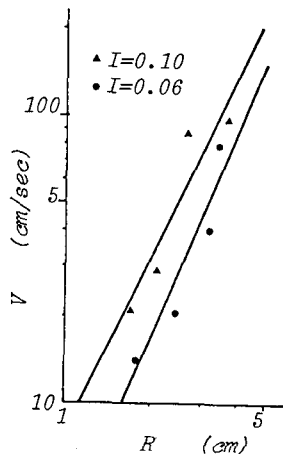


図 6

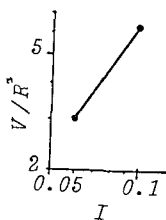


図 7

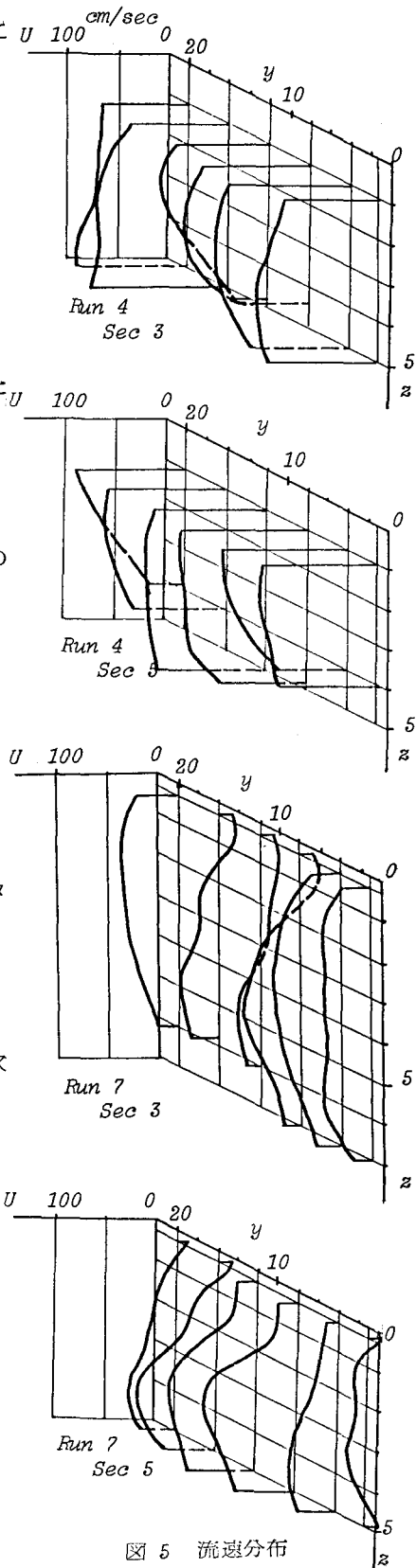


図 5 流速分布

図8は Bathurst によつて示された結果であり、実 $\sqrt{\frac{\theta}{f}} = \frac{V}{\sqrt{gRI}} = \left(\frac{R}{0.365D_{84}}\right)^{2.34} \times \left(\frac{W}{H}\right)^{7(\lambda-0.08)}$

測点は驚くほどよいまとまりをみせている。上式は、水深変化に伴う粗度の働きの変化を (R/D_{84}) のみならず、 λ の形で表現しており、広い適用性が期待される。表4のデータを図8に合わせてプロットした結果は黒円印で表わされている。ややバラツキが大きく、値が下側にくるが、上式のごく近傍に位置している。同様に冷水沢の実測値も近い所にあり、細かな定数は別としても上式が広く利用されうること、物理的にも重要な意味を有していることが推察される。ステップ・プールを主体とする河道における上式成立の可能性は、多くの山地河道への適用可能性を示唆するものであり、重要である。今後、同式の有する意味を明確にし、理論の裏づけをはかって、より信頼しうる式を確立していくことが望まれる。

5. まとめ

冷水沢におけるステップ・プール河床の実測結果をもとに、その模擬発生実験を試み、さらに特徴的ステップ礫を配した固定床実験を行なって次の結論を得た。

- 1). 冷水沢で観測されたステップには、分岐流れを有するものと、狭さく部を有するものがあり、交互して続いている。
- 2). ステップの形成実験によれば、ステップは反砂堆の形成と密接に関係している。実験におけるステップ波長は、試験地のステップ波長に対し、相似比(川幅比)を保っている。
- 3). 上記の性質をとり入れた固定床のステップ・プールの実験において、水位の変化に伴い、A、B、C 3つの水面形が生じた。これらはエネルギー損失と密接に関係している。
- 4). エネルギー損失は、一般に分岐部より狭さく部で大きく、急縮・急拡、段落ち、跳水に伴う損失機構とはほぼ同じ機構が働いているものと思われる。ただし、礫が水面上に出る流れでは、プールへの滝状の落ち込みが大きな損失を生み出し、又、全域射流の現われるタイプCの流れでは、加速・減速に伴う損失、空気混入による損失が大きい。
- 5). 大規模粗度上の流れの抵抗則として、Bathurst の式は適用性が広く、ステップ・プールを模擬した本実験の結果をもおおむねカバーする。
- 6). 冷水沢試験地の実測値と実験結果の比較では、1データのみであるが相似律が成立している。このことは、ステップ・プールを主体とする山地河床のモデル化には、幾何学的縮尺を考慮するだけで良いことを示している。Bathurst 式との概略の一致も、このことを裏づけている。

参考文献

- 1) Bathurst, J.C.: Flow resistance of Large-scale roughness, Jour. of Hy. div., Proc. of ASCE, Vol. 104, No. HY12, Decem., 1978
- 2) Bathurst, J.C., R-M. Li and D. B. Simons: Resistance equation for Large-scale roughness, Jour. of Hy. div. Proc. of ASCE, Vol. 107, No. HY12, Decem., 1981
- 3) 藤田・長谷川・大貫: 山地河川の流路形態に関する調査研究、土木学会北海道支部論文報告集、第41号、1985、2
- 4) Judd, H.E. and D.F. Peterson: Hydraulics of Large bed element channels, Report No. PRMG 17-6, Utah Water Research Laboratory, Utah State Univ., Logan, Utah, 1969

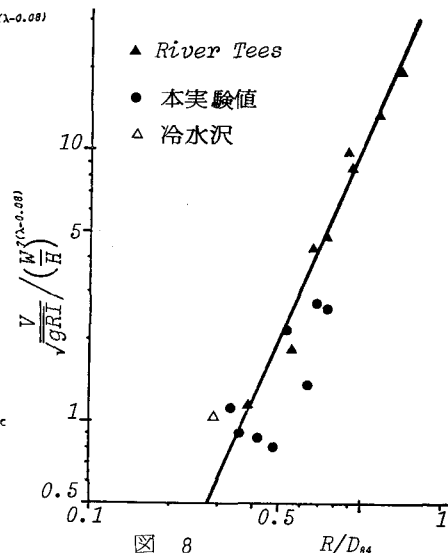


図 8