

礫床河川における流れの抵抗則に関する研究
FLOW RESISTANCE IN GRAVEL-BED RIVERS

(財)電力中央研究所 正会員 ○尾崎 幸男
(財)電力中央研究所 正会員 石橋 毅
(財)電力中央研究所 正会員 白砂 孝夫

1. はじめに

移動床流れの抵抗則に関しては色々な観点からこれまでに多くの研究がなされてきているが、実務レベルでは未だにManningの粗度係数“ n ”に頼らざるをえないのが実情である。しかし、河床変動計算や不定流計算では往々にして不合理な“ n ”値を使っている例も少なくない。このように従来の成果が十分に生かされていない理由としては、移動床流れは流砂と河床波を伴っているため、流れの多価性や抵抗の増減などを通してすべての水理量が何らかの影響を受けることが上げられる。すなわち、各水理量を整理する際に用いるパラメーター自体にも種々の影響が含まれているためである。¹⁾ また、河床における浸透性の問題、²⁾ 河道の蛇行性や網状性などの平面的形態の抵抗への寄与の他に、上流部においては粒径範囲の広い混合砂礫河床のため砂礫の移動限界および流れの抵抗則に関して粒度分布の効果が顕著に現われること、³⁾⁴⁾ さらに流速分布が従来の式では表現しきれないこと、⁵⁾ なども要因の1つとなっている。⁶⁾⁷⁾⁸⁾

本報告は、抵抗増減の物理的意味について考察するとともに、多数の実測資料に基づき移動床流れにおける基準あるいは視点となるべきパラメーターの抽出と礫床河川の抵抗則の確立を図ろうとしたものである。

2. 移動床流れの抵抗増減について

流れの抵抗則に関係する要因のうち、河床の浸透性および河道の平面形態の影響が他の要因に比べて小さい移動床流れを想定する。このとき、一般に抵抗則は式(1)で定義され、また河床の表面摩擦抵抗に関する有効径深 R は式(2)から求めることができる。¹⁰⁾

$$\frac{v}{u_*} \left[= \sqrt{\frac{8}{f}} \right] = \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \left(12.27 \frac{x R}{K_s} \right) \dots\dots\dots (1) \quad \frac{v}{u_*'} \left[= \sqrt{\frac{8}{f'}} \right] = \frac{2.3}{\kappa_0} \log_{10} \left(12.27 \frac{x' R'}{d} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 v = 断面平均流速、 $u_* = \sqrt{g R I_e}$ 、 $u_*' = \sqrt{g R' I_e}$ = 摩擦速度および有効摩擦速度、 f, f' = 河床の抵抗係数および表面摩擦抵抗係数、 R, R' = 径深および有効径深 (但し、実験水路においては河床の粗度に対する R_b, R'_b を用いる)、 I_e = エネルギー勾配、 κ, κ_0 = 土砂流および清水の場合のKarman定数で、 $\kappa_0 = 0.4$ 、 K_s = 砂粒相当粗度、 d = 河床砂礫の平均粒径あるいは d_{65} 、 x, x' = 水理的粗面と滑面を接続するパラメーターで $x = f_n(u_* K_s / 11.6 \nu)$ 、 $x' = f_n(u_*' d / 11.6 \nu)$ としてEinsteinの図表から求められる。¹⁰⁾

ここで、議論の簡単化のために式(1)、(2)を以下のように近似する。但し、 C, m = 定数。

$$\frac{v}{u_*} \simeq C \frac{\kappa_0}{\kappa} \left(\frac{x R}{K_s} \right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (3) \quad \frac{v}{u_*'} \simeq C \left(\frac{x' R'}{d} \right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (4)$$

上式(3)、(4)から、抵抗の増減を示す次式を得る。

$$\frac{f}{f'} \left[= \frac{R}{R'} = \frac{\tau_*}{\tau_*'} \right] = \left(\frac{\kappa}{\kappa_0} \right)^{\frac{2}{m+2}} \left(\frac{x'}{x} \right)^{\frac{2}{m+2}} \left(\frac{K_s}{d} \right)^{\frac{2}{m+2}} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\tau_* = u_*^2 / [(s-1)gd]$ = 無次元掃流力、 $\tau_*' = u_*'^2 / [(s-1)gd]$ = 無次元有効掃流力、 s = 砂礫の比重。式(5)において、 κ / κ_0 の項はWash loadや浮遊砂によって抵抗が減少することを表わし、 K_s / d の項は掃流砂や河床波による抵抗の増大を示している。このように、流砂や河床波の状況に応じて抵抗の増減が支配されていることがわかる。問題は式(5)と他の水理量とを関係付けることである。¹¹⁾

ところで、Karman定数の変化に関しては志村(1957)の研究などいくつかの研究成果があるが、次節ではKarman定数の変化を含ませた形で式(6)で定義する見掛けの相当粗度 $\hat{K}_s$ について検討を行う。

$$\frac{v}{u_*} \left[= \frac{2.3}{\kappa} \log_{10} \left(12.27 \frac{xR}{k_s} \right) \right] = \frac{2.3}{\kappa_0} \log_{10} \left(12.27 \frac{R}{\frac{k_s}{x}} \right) \dots\dots\dots(6)$$

流速係数 $\phi (=v/u_*)$ や Manning の粗度係数 “n” は他の水理量の変化に対して鈍感であるのに対し、見掛けの相当粗度 $\hat{k}_s$ は敏感に反応することから、抵抗則の精度向上（あるいは推定流量の精度）は $\hat{k}_s$ の適切な表示式の確立によって前進するものと考えられる。

3. 実測資料の検討

表－1 実測資料一覧

本研究では表－1 に示すような現地実験、模型実験および実際河川での実測資料合計 2,536 個の解析を行った。

まず最初に、表面摩擦抵抗に関する式(2)を用いてデータを水理学的に粗面、あるいは滑面および遷移の二通りに分類し、式(6)から逆算される見掛けの相対粗度 $\hat{k}_s/d$ と相対径深 R/d （実験では R_b/d ）との関係を図示したのが図－1 である。

図－1 を見ると、相当粗度 $\hat{k}_s$ は図中の破線で示すようにに最大で約 0.5 R であり、ほとんどのデータは次式の範囲に入っている。また、これらは流砂の有る場合のデータである。

$$\hat{k}_s \leq 0.5 R \dots\dots\dots(7)$$

さらに図－1 からは、表面摩擦抵抗に関して水理学的に粗面と見なしうるデータは、

$$\text{実際河川では } R/d \leq 150, \quad \text{模型実験では } R_b/d \leq 20 \dots\dots\dots(8)$$

の範囲にあることがわかる。

ところで、相対径深が小さく式(7)からはずれているデータ（即ち $\hat{k}_s > 0.5 R$ のデータ）は流砂の無い場合の礫床河床のデータであって式(7)で表わされるデータとは傾向が異なるため別途に検討する必要がある。本研究では次節において詳述する。

さて、見掛けの相対粗度 $\hat{k}_s/d$ は最近の研究成果を踏まえて関数表示すると次式のように表わされる。

$$\frac{\hat{k}_s}{d} = f_n \left(\frac{R}{d}, \tau_*, \tau'_*, F_r, Re, \frac{B}{R}, R_*, \dots \right) \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $F_r = v/\sqrt{gR}$ は流れの Froude 数、 $Re = 4vR/\nu$ は流れの Reynolds 数、 B/R = 相対水面幅、 $R_* = \sqrt{(s-1)gd^3}/\nu$ 、 $d_* = R_*^{2/3}$ = 無次元粒径。

式(5)および図－1 と Engelund (1967)²⁰⁾、岸・黒木 (1973)¹⁾、林・矢内 (1980)²¹⁾ らの研究を参考にすると、式(9)は次式のように表わすことができる。但し、本研究では τ'_* の代りに τ_*/τ_{*c} を用いる。限界掃流力に関しては、実測値（推定値）が有る場合にはその値を用い、無い場合には岩垣公式により求めた値を使用した。

種別	(a) 現地実験	全資料数 (R _b /d)	水理学的粗面	流砂の有無	文献
a-1	高瀬川	403 (1.0 ~ 8.0)	403	有り	12)
	(b) 模型実験	全資料数 (R _b /d)	水理学的粗面	流砂の有無	文献
b-1	Gilbert	876 (5.0 ~ 400)	172	有り	13)
2	Vanoni & Brooks	139 (200 ~ 3 × 10 ³)	無し	“	14)
3	Guy et al.	340 (100 ~ 2 × 10 ³)	6	“	15)
	(c) 実際河川	全資料数 (R/d)	水理学的粗面	流砂の有無	文献
c-1	Rio Grand River	12 (10 ³ ~ 4 × 10 ³)	無し	有り	15)
2	斐伊川及び大型水路	36 (60 ~ 800)	23	“	16)
3	利根川 (川 俣)	95 (900 ~ 1.5 × 10 ⁴)	無し	有り (推定)	17)
4	“ (芽吹橋)	47 (10 ⁴ ~ 3 × 10 ⁴)	“	“ (“)	“
5	“ (布川)	209 (10 ⁴ ~ 3 × 10 ⁴)	“	“ (“)	“
6	渡良瀬川 (早川田)	27 (3 × 10 ³ ~ 1.5 × 10 ⁴)	“	“ (“)	“
7	小貝川 (川 又)	133 (6 × 10 ³ ~ 1.5 × 10 ⁴)	“	“ (“)	“
8	鬼怒川 (平方)	71 (5 × 10 ³ ~ 1.5 × 10 ⁴)	10	“ (“)	“
9	北上川 (登米)	23 (10 ³ ~ 10 ⁴)	無し	“ (“)	“
10	Missouri River	23 (10 ³ ~ 2 × 10 ⁴)	“	“	18)
11	Tees River	9 (0.4 ~ 2.0)	9	無し (推定)	6)
12	By Bray	67 (3.0 ~ 150)	67	“ (“)	9)
13	By Thompson & Campbell	26 (1.8 ~ 20)	26	“ (“)	19)

(脚註) 合計資料数は 2,536、 R/d or $R_b/d = 0.4 \sim 3 \times 10^4$ 、このうち平坦河床としたとき水理学的に粗面 ($d/\delta' = u_*'/11.6\nu > 6$) と見なしうる資料数は 176、および R/d or $R_b/d = 0.4 \sim 200$ 。

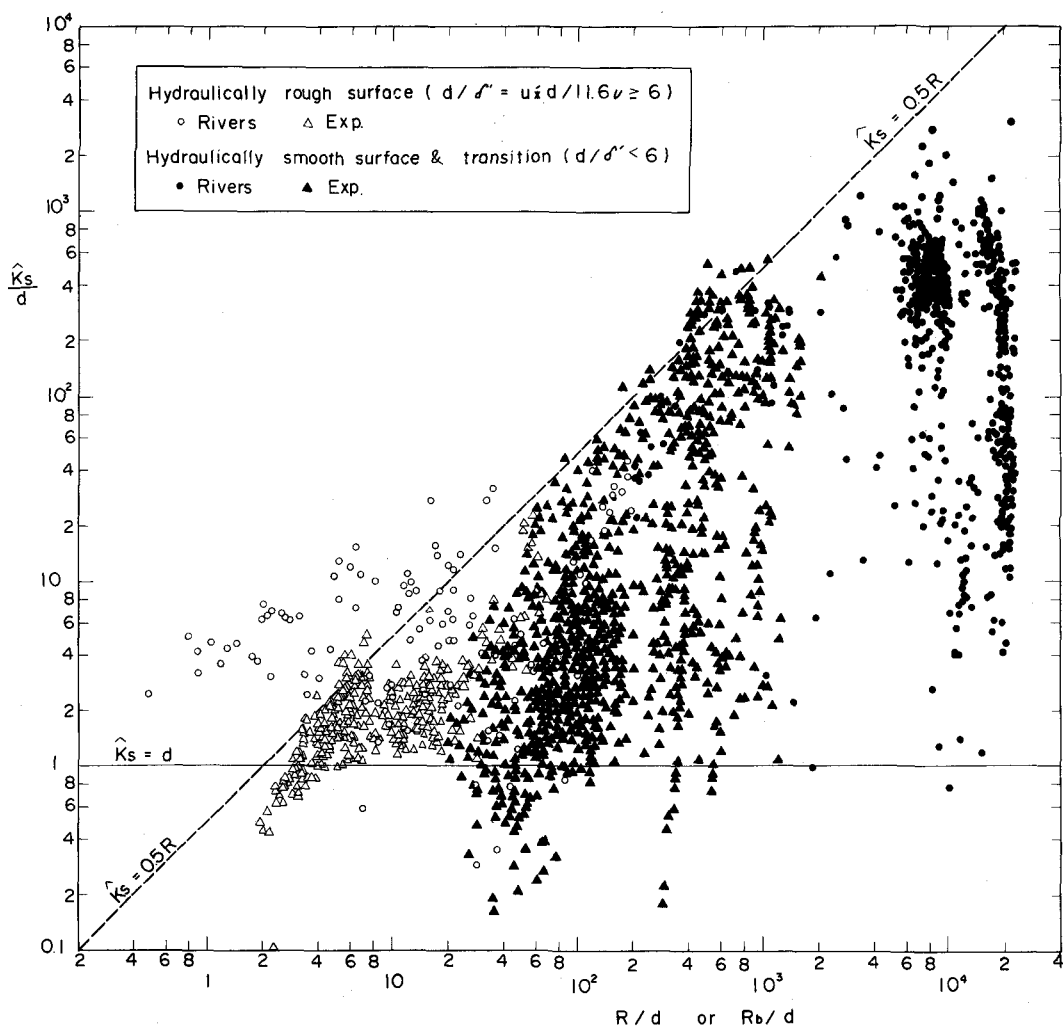


図-1 見掛けの相対粗度 $\hat{k}_s/d$ と相対径深 R/d (or R_b/d)

$$\frac{\hat{k}_s}{d} = f_{\Pi} \left(\frac{R}{d}, \frac{\tau_{*c}'}{\tau_{*c}} \right) \quad \text{..... (10)}$$

そこで図-1において、相対径深 R/d の狭い範囲ごと ($R/d \approx \text{const.}$ 上のデータ)に限って式(10)の関係を図示すると、図-2 (a),(b),(c)および(d)のようである。ここで、図中の記号の説明を表-2に示す。

図-2から、外力としての有効掃流力の増加に伴う河床形態の形成と抵抗の増減の様子を明確に知ることができる。即ち、有効掃流力が増加すると河床形態としては RipplesやDunesが形成され、相対粗度も増加してこの河床形態で最大値となる。さらに有効掃流力が増加すると、河床形態は Transition → Flat bed → Antidunesと変化し相対粗度は減少することがわかる。但し、従来、言われているように Antidunesで再び相対粗度が増加するという点に関しては、このときは掃流力がかなり大きいので浮遊砂が多く、これがKarman定数の減少をもたらすため、抵抗の増減は明確に把握できないようである。

表-2 記号の説明

記号	河床形態
■	Ripples
● □	Dunes
● ■	Transition
○ □	Flat bed
● ■	Antidunes
● ■ ▲	Uncertain

ここで、図-1, 2の結果から式(10)の上限値を模式的に示すと図-3のよう

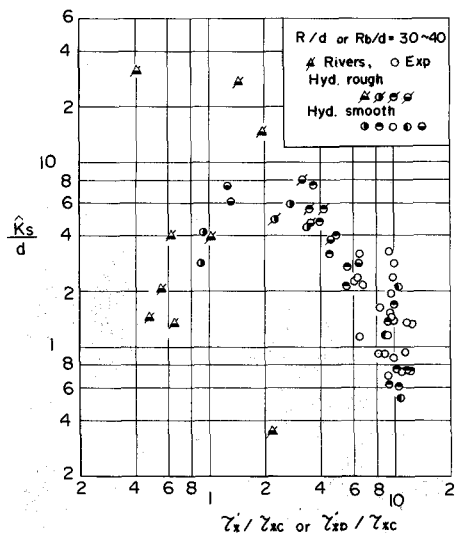


図-2 (a)

になると考えられる。この図から相対粗度の三次元的挙動がわかる。

このように、流砂の存在する移動床流れの抵抗増減は式(10)により十分説明することができる。但し、式(10)の具体的関数形については今後の理論的考察を加味して決定するつもりである。また、図-2におけるデータの厚みは、別のパラメーターの導入により解決できるものと考えられるが、この点についても今後の課題としたい。

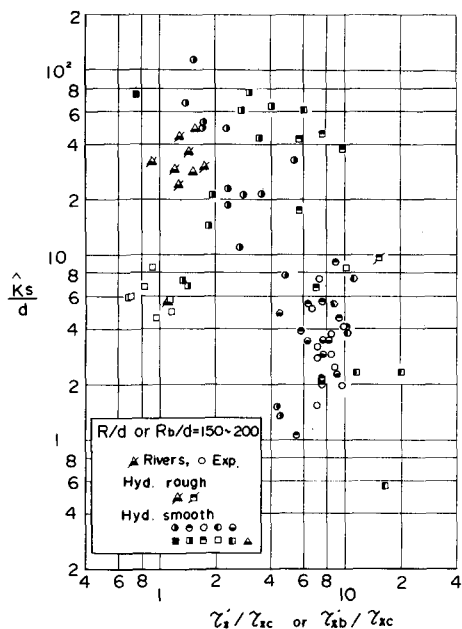


図-2 (c)

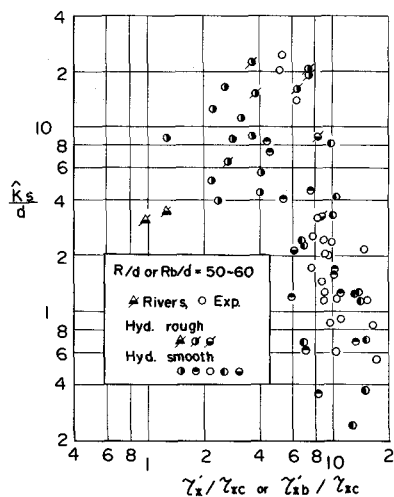


図-2 (b)

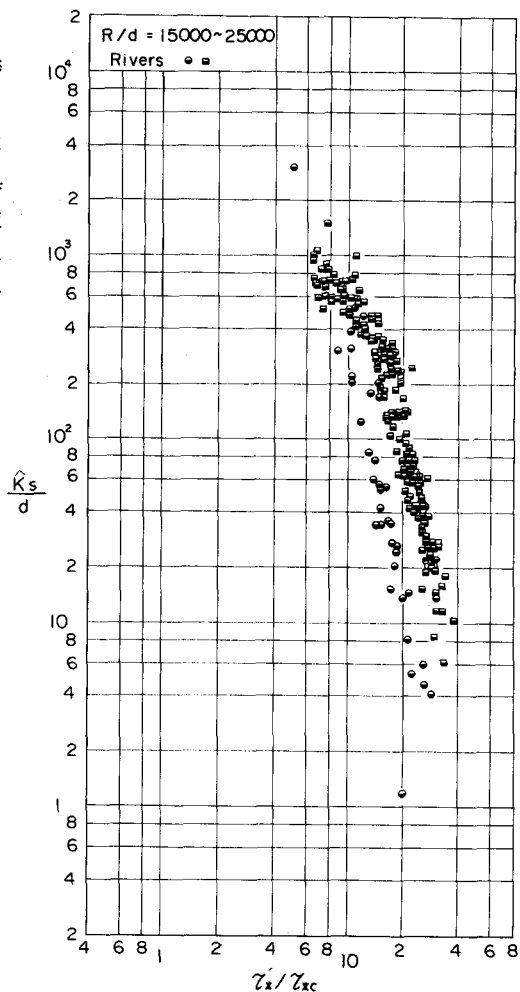


図-2 (d)

4. 礫床河川の抵抗則

(1) 混合砂礫河床の平均粒径に対する限界掃流力について

流れの抵抗則に関しては流砂の有無が大きく係ってくることから、礫床河川の抵抗則を解明するためには、まず混合砂礫河床における平均粒径に対する限界掃流力を求めておく必要がある。前報で示したようにこの限界掃流力は一様粒径の場合のそれに比べて小さくなるようである。ここでは、前報と同様に表-3に示す高瀬川現地実験結果に基づいて考察する。

この平均粒径の限界掃流力がわかれば、各粒径に対する限界掃流力は Egiazaroff 型の粒径別限界掃流力公式により求めることができる。

まず、表-3における σ および M は河床砂礫の粒度分布から求まる標準偏差および均等比であって次のように定義される。

$$\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}, \quad M = \frac{\sum_{p=0}^{p=50} d_p}{\sum_{p=0}^{p=100} d_p} \quad (11)$$

次に、表-3のデータにより平均粒径の限界掃流力 τ_{*cm} を定式化すると次式を得る。

$$K [\equiv \tau_{*cm}/(\tau_{*cm})_0] = \sigma_0^{-n}, \quad n = 19.0 M_0^{3.24} \quad (12)$$

ここに、 $(\tau_{*cm})_0 = (\tau_{*cm})_{1,F}$ 、一様粒径に対する岩垣公式による平均粒径の限界掃流力、 σ_0 、 M_0 = それぞれ実験前の標準偏差および均等比。

式(12)とデータとの比較をすると図-4(a)、(b)となり両者は良い一致を示している。さらに、図-4(a)中には Little & Mayer (1976) による Armer coat 上の限界掃流力である次式を併わせて示した。

$$K = \sigma_0^{-0.580} \quad (13)$$

ここに、 $(\tau_{*cm})_0 = 0.0355$ 。

図-4(a)を見ると、式(12)と(13)はほぼ同様の傾向を示しているが両者とも土屋 (1963) の結果とは異なっている。

以上のとおり、限界掃流力の比值 K は、

河床砂礫の標準偏差と均等比の関数として表わされると考えられるが、式(12)の妥当性については今後の実験データの集積を待って再検討する必要がある。

(2) 礫床河川の抵抗則

前節の図-1における礫床河川のデータは流砂の無い場合のものであって、水流は山地河川でよく見られるような転石の間を、あるいは転石が少し水没した状態で流れている状況にある。このような所では流速分

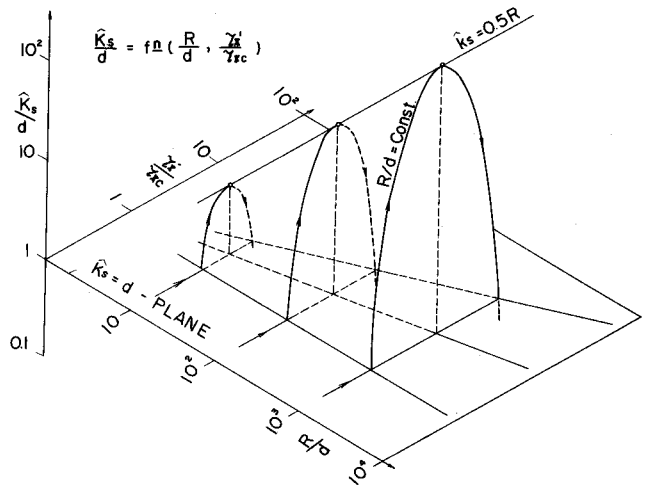


図-3 相対粗度の上限値の三次元的構造 (模式図)

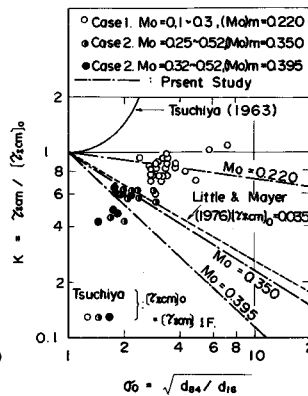


図-4(a) 実測値と式(12)

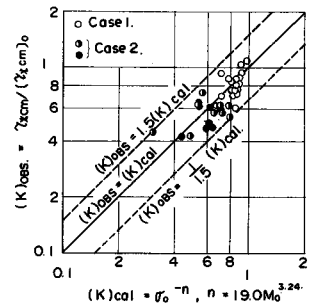


図-4(b) 実測値と計算値との比較

布として従来の log law
は成り立っていないもの
と考えられる。しかしこ
こでは、データ整理上の
1つのフィルターとして式
(6)を仮定し、見掛けの相
当粗度 k_s の定式化を行う。

さて、礫床河川の相对
粗度を以下の3式で表わ
してみる。

$$\frac{\hat{k}_s}{d} = f_n\left(\frac{R}{d}, R_*\right) \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\hat{k}_s}{d} = f_n\left(\frac{R}{d}, Re\right) \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\hat{k}_s}{d} = f_n\left(\frac{R}{d}, Fr\right) \dots\dots\dots (16)$$

上式のパラメーターで
データ整理を行うと図一
5 (a), (b), (c) のように
なる。

図一5によると、パラ
メーターとして無次元粒
径 $d_* (= R_*^{\frac{2}{3}})$ および流れ
の Reynolds 数 Re では明
瞭な法則性は見い出せな
いが、この両者に比較す
ると流れの Froude 数 Fr
では近似的に次式が成り
立っている。

$$\frac{\hat{k}_s}{d} = 1.5 \left(\frac{R}{d}\right)^{0.6} Fr^{-0.8} \dots\dots\dots (17)$$

従って、上式(16)に代入することによって、礫床河川の抵抗則が式(18)のように得られる。

$$\frac{v}{u_*} = 5.25 + 4.6 \log_{10}(Fd) \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 $Fd = Fr \sqrt{R/d} = v/\sqrt{gd}$ 。

ここで、式(18)と実測値との比較をすると図一6のようになり、全体的には一致の度合は比較的良好である
が $Fd > 0.8$ ではかなりのバラツキが見られ礫床河川の抵抗則の複雑さを現わしている。しかし、式(18)により
礫床河川の抵抗則解明の手掛りはつかまえたものと考えられる。

ところで、式(18)は数少ないデータに基づいているため他の礫床河川への適用性に関しては、上述のデータの

表一3 高瀬川現地実験結果

Tcst. No.	実験前後の平均値				平均粒径 の標準偏差 τ_{cen} (mm)	実験前		実験後		水路幅 B=1.50 (m) ピーク流量近傍の平均値							
	d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)	d _m (mm)		σ_0 (mm)	M ₀ (mm)	σ_a (mm)	M _a (mm)	v (m/s)	h (m)	$I_a \times 10^2$ (mm)	R (m)	U _a (m/s)	Fr	Re $\times 10^{-6}$ (mm)	
I-1	1.86	26.6	97.0	56.0	-0.543	7.31	.068	7.07	.114	2.48	.362	1.87	.244	.212	1.60	2.42	
2	4.45	64.0	148	78.8	-0.516	7.21	.114	3.19	.220	2.82	.641	1.85	.346	.250	1.53	3.91	
3	19.6	84.2	173	102	-0.435	3.24	.229	2.84	.219	2.97	.628	1.92	.341	.253	1.62	4.05	
4	13.3	105	243	129	-0.397	6.84	.128	3.19	.226	2.99	.652	1.89	.348	.254	1.62	4.17	
5	24.0	113	227	125	-0.372	3.22	.257	2.95	.224	2.85	.562	1.83	.321	.240	1.61	3.67	
6	22.0	108	193	119	-0.299	2.96	.225	2.96	.225	2.34	.397	1.82	.260	.215	1.47	2.43	
7	25.0	107	198	122	-0.406	2.89	.225	2.53	.249	3.19	.755	1.82	.376	.259	1.66	4.79	
8	25.5	118	198	129	-0.436	3.27	.246	2.61	.272	3.35	.760	1.97	.377	.270	1.74	5.05	
9	30.4	118	225	136	-0.421	2.61	.278	2.71	.236	3.33	.885	1.97	.407	.280	1.67	5.42	
10	40.3	128	237	143	-0.469	2.72	.241	1.98	.361	3.39	1.05	1.97	.437	.291	1.64	5.93	
11	20.0	103	228	120	-0.440	4.81	.159	2.85	.245	3.24	.798	1.97	.387	.273	1.66	5.01	
12	31.0	114	240	132	-0.381	2.92	.246	2.60	.254	3.25	.934	1.91	.416	.279	1.61	5.41	
13	26.0	106	233	130	-0.416	2.74	.225	3.07	.221	3.31	.910	1.92	.410	.278	1.65	5.43	
14	17.0	103	202	122	-0.466	1.65	.153	2.88	.219	3.45	.951	2.02	.420	.289	1.70	5.79	
15	25.3	117	207	130	-0.379	2.87	.231	2.95	.255	2.95	.780	1.94	.382	.270	1.52	4.50	
16	23.0	116	238	135	-0.373	2.98	.257	3.43	.189	3.14	.833	1.94	.395	.274	1.60	4.96	
17	7.60	84.0	180	105	-0.354	6.07	.154	2.86	.220	2.48	.367	2.00	.246	.220	1.59	2.44	
18	14.8	105	210	115	-0.414	3.11	.244	4.19	.168	2.84	.639	2.04	.345	.263	1.54	3.92	
19	19.7	102	223	125	-0.410	4.38	.156	3.15	.222	2.96	.719	2.06	.367	.272	1.56	4.34	
20	21.5	113	200	120	-0.446	2.57	.283	4.03	.229	3.25	.742	2.12	.373	.279	1.70	4.85	
21	19.0	105	220	127	-0.439	4.17	.210	3.20	.189	3.19	.783	2.10	.383	.280	1.65	4.89	
22	24.8	117	272	142	-0.376	3.31	.189	3.12	.239	2.89	.827	2.08	.393	.283	1.47	4.55	
23	24.2	117	240	131	-0.369	3.04	.195	2.74	.267	2.75	.572	2.14	.325	.261	1.54	3.56	
24	33.3	141	257	162	-0.351	2.91	.271	2.93	.255	2.75	.589	2.29	.330	.272	1.53	3.63	
25	29.5	131	300	157	-0.351	2.91	.225	3.44	.243	2.82	.557	2.25	.320	.265	1.59	3.60	
26	19.8	101	210	122	-0.461	5.08	.188	2.80	.186	3.36	.891	2.06	.407	.287	1.68	5.46	
27	23.1	99.0	234	125	-0.433	2.84	.206	3.41	.192	3.47	1.05	1.99	.436	.292	1.68	6.06	
II-1*	23.0	116	193	125	-0.310	2.79	.306	3.47	.212	2.80	.726	1.62	.368	.242	1.48	4.13	
2*	32.3	129	285	153	-0.271	3.40	.223	2.51	.275	2.78	.748	1.64	.374	.245	1.45	4.16	
3*	67.6	148	247	161	-0.368	2.31	.329	1.65	.416	2.85	.811	1.55	.589	.243	1.46	4.44	
4	79.0	151	252	163	-0.307	1.66	.415	1.82	.401	2.94	.845	1.57	.397	.247	1.49	4.67	
5	74.0	169	277	177	-0.302	2.25	.316	1.60	.418	2.94	.706	1.50	.363	.231	1.56	4.27	
6	78.0	152	250	174	-0.325	1.79	.364	1.90	.381	3.03	.861	1.46	.401	.239	1.53	4.85	
7*	65.0	144	280	166	-0.284	1.96	.353	2.09	.341	2.95	.870	1.39	.403	.235	1.49	4.75	
8*	59.5	140	230	156	-0.314	2.09	.350	1.93	.390	2.93	.877	1.32	.404	.228	1.47	4.73	
9*	54.0	146	303	170	-0.313	2.30	.315	2.38	.293	3.17	.985	1.37	.426	.239	1.55	5.39	
10*	60.0	167	347	191	-0.286	2.34	.302	2.43	.294	3.09	.982	1.38	.425	.240	1.51	5.25	
11	74.0	170	350	196	-0.296	2.15	.314	2.17	.322	3.19	1.02	1.39	.432	.243	1.55	5.51	
12*	65.5	153	317	178	-0.316	2.14	.327	3.14	.329	3.12	1.00	1.39	.429	.242	1.52	5.34	
13	80.0	172	268	187	-0.236	1.93	.337	1.90	.373	2.70	.473	1.42	.290	.201	1.60	3.14	
14*	92.5	195	370	203	-0.213	1.89	.374	1.91	.339	2.32	.472	1.43	.289	.201	1.38	2.69	
15*	99.0	187	345	204	-0.223	1.90	.340	1.84	.362	2.51	.583	1.43	.328	.215	1.40	3.29	
16	95.0	178	314	213	-0.211	1.84	.363	1.79	.663	2.51	.577	1.44	.326	.215	1.41	3.28	
17	88.0	177	290	187	-0.236	1.85	.359	1.82	.371	2.54	.591	1.46	.330	.217	1.41	3.36	
18	91.0	171	278	181	-0.246	1.81	.379	1.66	.395	2.50	.626	1.45	.341	.220	1.37	3.42	
I-1~27 : ○, I-1*印 : ●, I-1*印以外 : ●										$u_* = \sqrt{g R I_a}$, $Fr = v/\sqrt{g R}$, $Re = 4 v R/\nu$							
$\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$, $M = \sum_0^{50} d dp / \sum_{50}^{100} d dp$																	

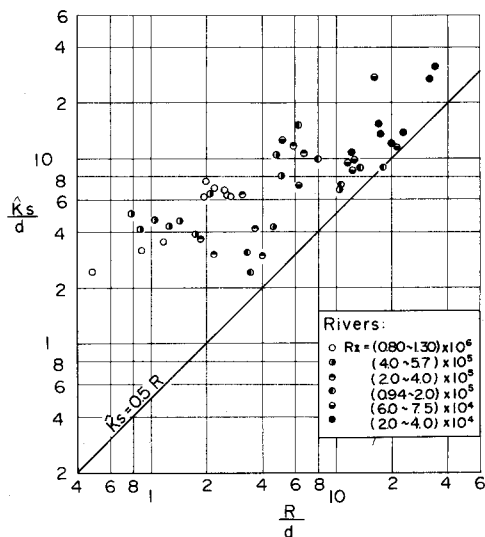


図-5(a) R_s による整理

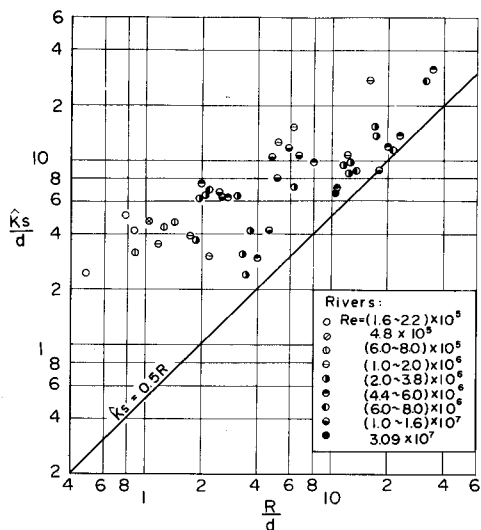


図-5(b) R_e による整理

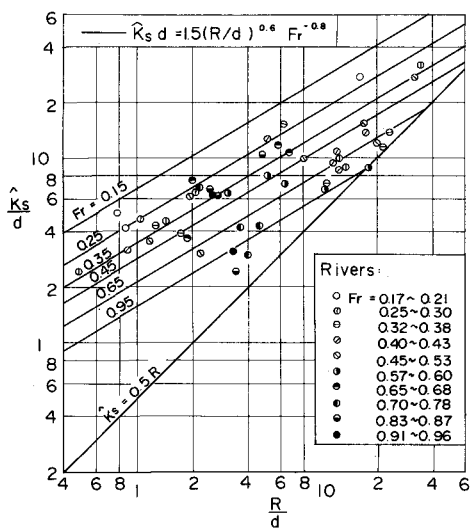


図-5(c) F_r による整理

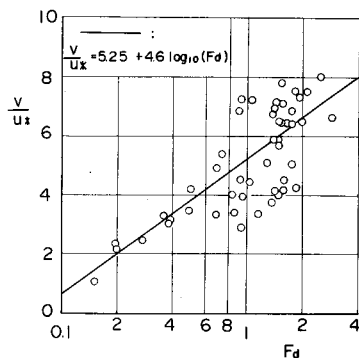


図-6 実測値と式(8)との比較

バラッキ同様未だ問題があると思われる。これらの点については現在、大型水路による実験および山地河川における実測を計画しており今後詳細な検討を行う予定である。

5. おわりに

本研究により、流砂の有る移動床流れの抵抗則の内部構造と、これとは傾向を異にする流砂の無いときの礫床河川のデータの特徴と抵抗則についてかなりの程度明らかにすることができたものと考えられる。今後は本論中で述べた残された課題について色々な角度からの研究を進めて行くつもりである。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、千葉工業大学 4 回生杉浦陽一郎君から熱心な協力を頂いた。ここに記して感謝の意

を表する。

引用文献

- 1) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集第210号，1973，pp.65-91.
- 2) 尾崎幸男・石橋 毅：移動床流れの抵抗則に関する研究，土木学会第35回年講Ⅱ-153, 1980, pp.302-303.
- 3) Simons, D. B., Al-Shaikh-Ali, K. S. and Li, R-M.: Flow resistance in cobble and boulder riverbeds, Proc. ASCE, vol.105, HY5, 1979, pp.477-488.
- 4) 日野幹雄・山田 正・川端規之・太田明彦：滑面・粗面および浸透層上の流れの抵抗則と乱れの構造，土木学会第24回水講，1980，pp.285-291.
- 5) Onishi, Y., Jain, S. C. and Kennedy, J. F.: Effects of meandering in alluvial streams, Proc. ASCE, vol.102, HY7, 1976, pp.899-917.
- 6) Bathurst, J. C.: Flow resistance of large-scale roughness, Proc. ASCE, vol.104, HY12, 1978, pp.1587-1603.
- 7) 平野宗夫・岩元 賢：混合砂礫床の粗度について，新砂防，113，1979，pp.17-21.
- 8) 林 泰造・尾崎幸男・石橋 毅：混合砂礫の掃流砂量に関する研究，土木学会第24回水講，1980，pp.35-43.
- 9) Bray, D. I.: Estimating average velocity in gravel-bed rivers, Proc. ASCE, vol.105, HY5, 1979, pp.1103-1122.
- 10) Einstein, H. A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, Technical Bulletin 1026, U.S. Dept. of Agric., Washington, D. C., 1950, 78p. または，Einstein, H. A. and Barbarossa, N. L.: River channel roughness, Trans. vol.117, 1952, pp.1121-1132.
- 11) 志村博康：浮遊砂を有する水流の諸特性について，土木学会論文集第46号，1957，pp.22-29.
- 12) 石橋 毅・磯部明久：高瀬川上流部の土砂流出に関する研究(第1報)，電中研依頼報告 70521, 1970.
- 13) Gilbert, G. K.: The transportation of debris by running water, U. S. Geol. Survey Prof. Paper 1914.
- 14) Vanoni, V. A. and Brooks, N. H.: Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, Rep. 68, Sedimentation Laboratory, California Inst. of Tech., Pasadena, California, 1957.
- 15) Guy, H. P., Simons, D. B. and Richardson, E. V.: Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 462-I, 1966, 96p.
- 16) Shinohara, K. and Tsubaki, T.: On the characteristics of sand waves formed upon the beds of the open channels and rivers, Rep. of Research Inst. for Applied Mech., Kyushu Univ. vol. VII, 25, 1959.
- 17) 山本晃一：相似律の観点から見た移動床流れの水理(Ⅲ)，建設省土研資料第1154号，1976.
- 18) Shen, H. W., Mellema, W. J. and Harrison, A. S.: Temperature and Missouri River stages near Omaha, Proc. ASCE, vol.104, HY1, 1978, pp.1-19.
- 19) Thompson, S. M. and Campbell, P. L.: Hydraulics of a large channel paved with boulders, J. of Hydraulic Research 17, 4, 1979, pp.341-354.
- 20) Engelund, F.: Closure to "Hydraulic resistance of alluvial streams", Proc. ASCE, vol.93, HY4, 1967, pp.286-296.
- 21) 林 泰造・矢内栄二：砂堆の波形勾配及び掃流砂量について，土木学会第24回水講，1980，pp.323-328.
- 22) Little, W. C. and Mayer, P. G.: Stability of channel beds by armoring, Proc. ASCE, vol.102, HY11, 1976, pp.1647-1661.
- 23) 土屋義人：混合砂礫の限界掃流力に関する研究，京大防災研年報第6号，1963，pp.228-253. または，土屋義人：混合砂礫の限界掃流力について，土木学会論文集第98号，1963，pp.1-9.