

河川の粗度に関する研究

河川研究室

はじめに

河川の粗度に関しての研究は、すでに古い歴史をもち、幾多の研究・調査がなされてきた。しかし、それに関する多くのパラメータの複雑なむすびつきが、今なおその解明を拒みつつけている。近年、水流の理論解析の発展が著しいのに反し、いまだ粗度の理論的な取扱い方が十分に行なわれえないことは、河川の全体的な把握に不安が残ることになる。

本年度から、建設省技術研究会指定課題として「河川の粗度に関する研究」を行なうことになったが、本文は昭和45年度北海道開発局において調査・研究した成果について、河川研究室が概略を取りまとめたものである。

1. 既往の諸研究の検証

自然河川の抵抗法則として用いられるマンニングの平均流速公式と対数公式は次のようである。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

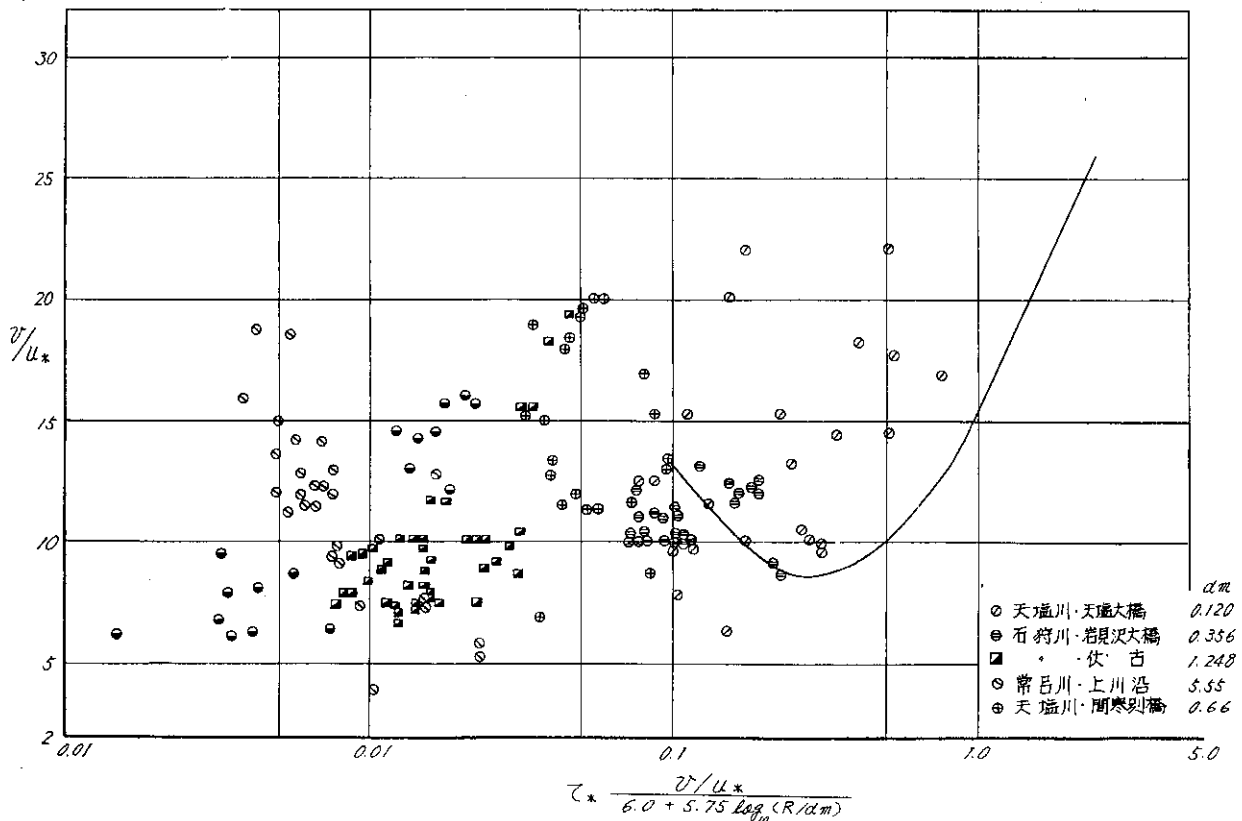
$$\frac{v}{u_*} = A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \log_e \frac{R}{k_s} \dots \dots \dots (2)$$

ここに v : 平均流量, n : マニングの粗度係数, R : 径深, I : 水面勾配, u_* : マサツ速度 $= \sqrt{gRI}$, A_r : 積分常数項, κ : カルマン常数, g : 重力加速度および k_s : 相当砂粒粗度である。

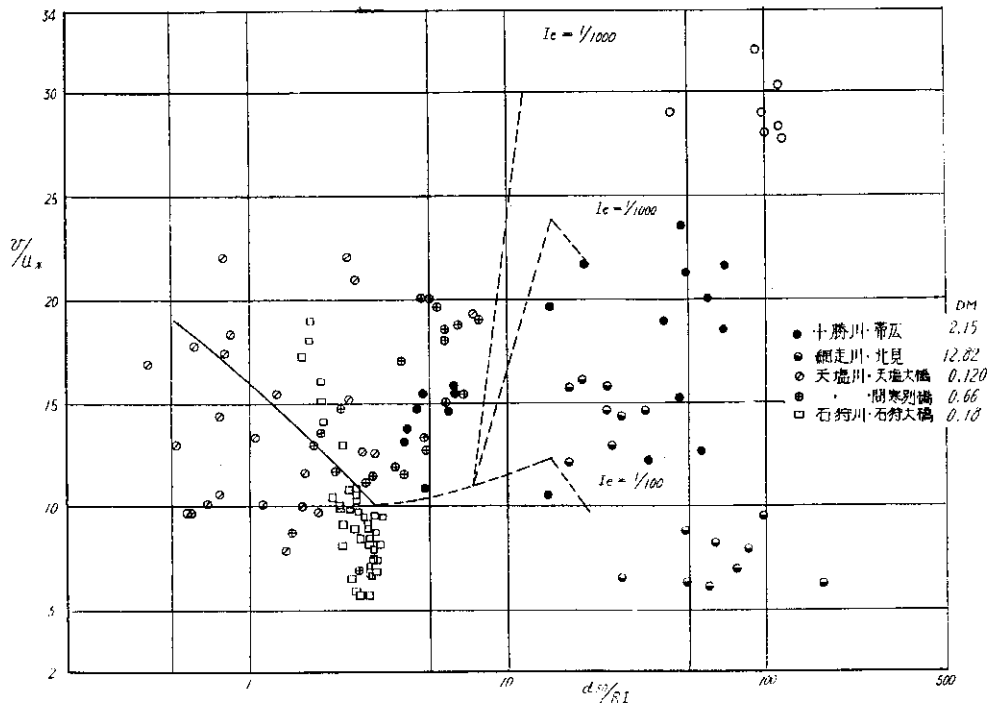
(1), (2)式を変形すると、マンニングの粗度係数 n と対数公式のパラメータの間に

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}} \cdot \frac{1}{\frac{v}{u_*}} \dots \dots \dots (3)$$

の関係が導びかれる。したがって粗度係数 n を推定するためには、相当粗度 k_s , カルマン常数 κ および積分常数項 A_r あるいは v/u_* が分かればよい。従来の研究では κ および A_r の水理量に対する変化は、 k_s の変化に比して小さい。 κ は浮遊砂濃度によって変化し、その範囲は 0.60



図—1 篠原・椿氏の曲線



図—2 芦田氏の曲線

～0.20であるといわれる。また、 k_s は河床砂の移動のない状態では、河床材料平均粒径 d_m に対して $(0.5 \sim 4.0)d_m$ であるが、河床形状が河床砂の移動によって変化するにしたがい、 10^3 のオーダーにまで変化する。

k_s と水理量との関係については、椿・古屋、岩垣、須賀らの研究が、また v/u_* と水理量との関係については篠原・椿、芦田の研究がある。ここでは上述の κ と A_r を一定としてこれらの研究について検討してみる。すなわち、 $\kappa=0.4$ 、 $A_r=8.5$ とする。

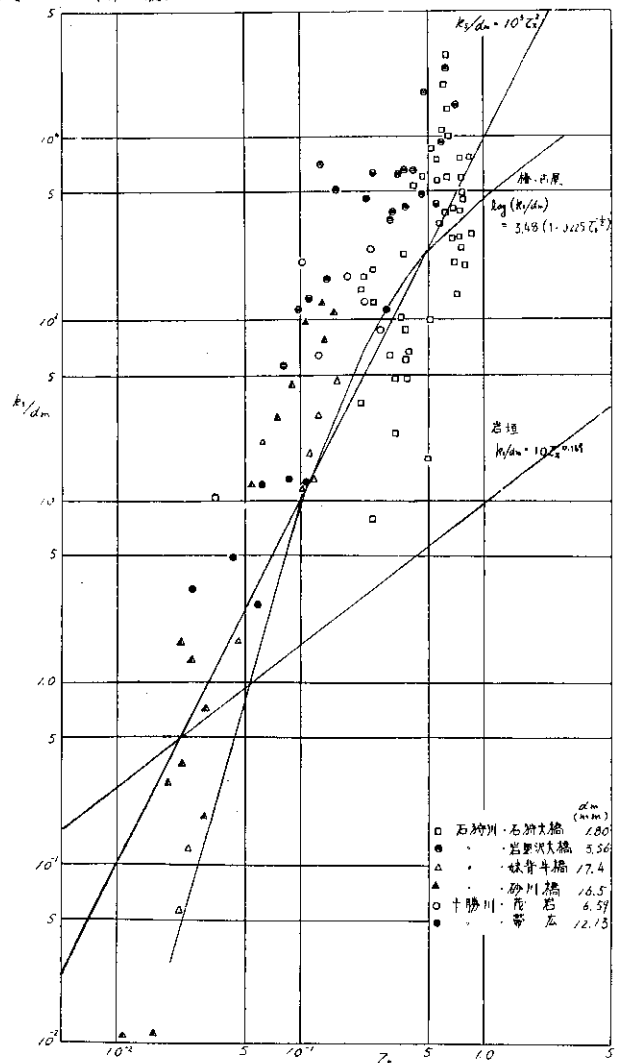
これらの検証に用いるデータは、既往の実測値の中から、H～Q図を作成し最小二乗法で引いたH～Q曲線から大きくはずれるデータは除いてある。観測値はすべて低水路についてのものである。

1-1 篠原・椿の方法

篠原・椿は、河川の実測値より得られる関係として、 $v/u_* \sim \tau_* (v/u_* / (6.0 + 5.75 \log_{10}(R/d_m)))$ の関係を図—1の曲線として求めている。ここに $\tau_* = \tau_o / (\zeta_s - \zeta) g \cdot d_m$ 、 ζ_s ：砂粒の密度、 ζ ：水の密度である。これに北海道の河川のデータをプロットしてみると図—1のようになる。図では一定の傾向はみられない上に、横軸の τ_* を含む項の値の小さい左側にデータが偏っており両氏が推定した曲線の範囲外に点が多く集まる結果となった。

1-2 芦田の方法

芦田は $v/u_* \sim d_{50}/RI$ の関係について研究している。 d_{50} は河床材料の50%粒径である。これは、粗い平均的な線として求められたものであって、実測値をプロット



図—3 $k_s/d_m \sim \tau_*$

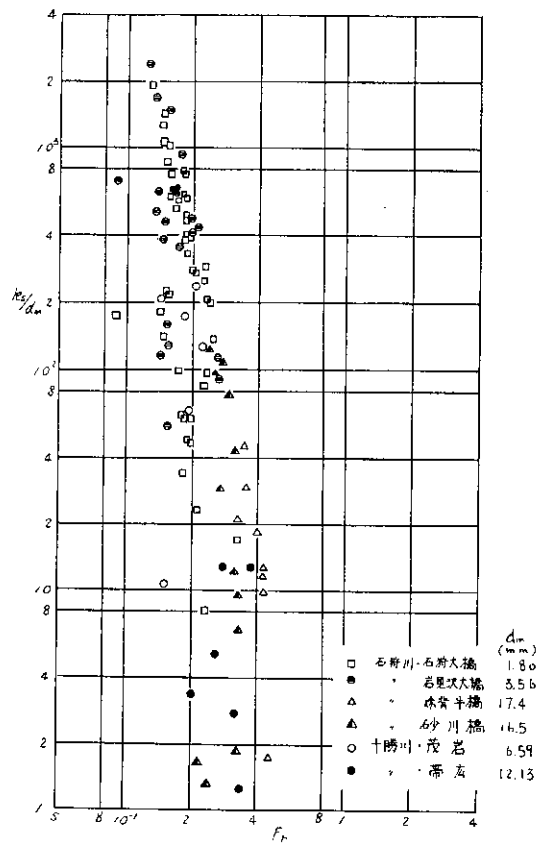
してみてもあまりよい結果とはなっていない（図—2 参照）。図中、帯広の観測水面勾配は1/10,000~1/1,000,北見のそれは1/300~1/1,000である。

1-3 $k_s/d_m \sim \tau_*$ の関係

$k_s/d_m \sim \tau_*$ については椿・古屋, 岩垣および須賀の研究がある。 k_s を前述のように $\kappa=0.4$, $A_r=8.5$ として流速分布より対数公式より求めて, この関係についてプロットしたものが図—3である。全体的にみて椿・古屋の曲線に傾向は一致しているがバラツキは大きい。砂れんの発生しない場合の岩垣の実験式のまわりには点はあつまらず, これらの観測所では dune あるいは ripple など移動床の状態にあることがうかがえる。石狩大橋の資料に注目すると, 勾配がもっと急になっているのがわかる。

1-4 $k_s/d_m \sim F_r$ の関係

芦田氏は, k_s/d_m とフルード数 F_r の関係について, $k_s/d_m = f(\tau_*)F_r^{-2}$ を提案している。1-3 と同じデータを用いてこの関係についてプロットしてみると, 図—4 のようになり, フルード数の2乗ではなくもっと大きい数に反比例していることがわかる。しかしこれも分散は大きい。



図—4 $k_s/d_m \sim F_r$

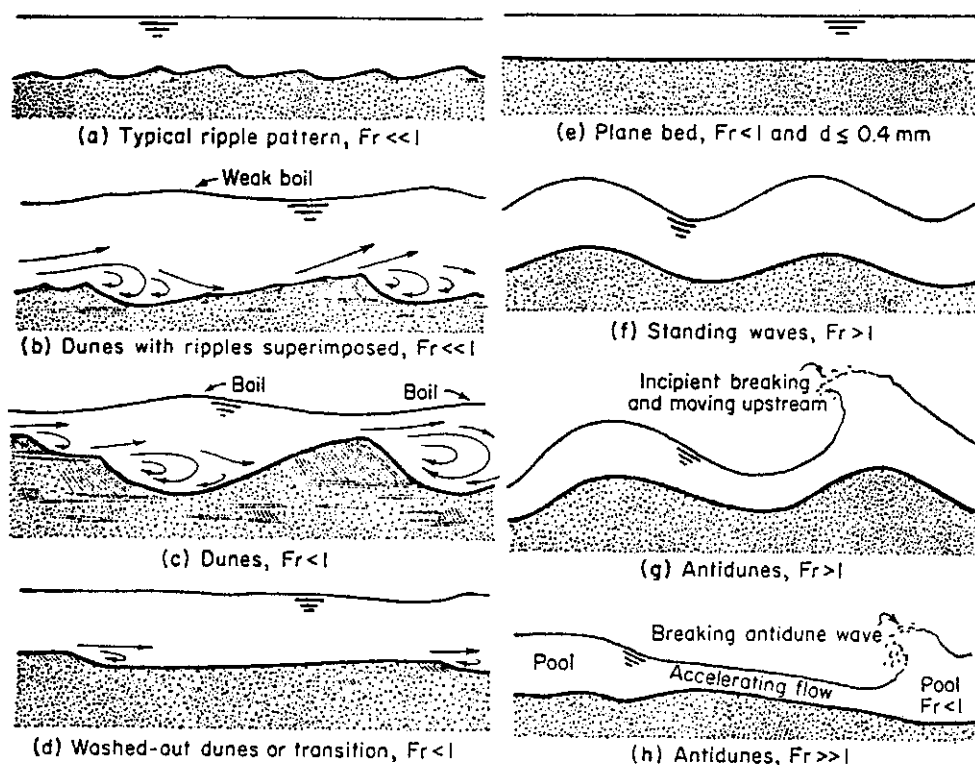


FIG. 7-9. Forms of bed roughness in alluvial channels. (After Richardson, Simons, and Haushild [16, 17].)

図—5 河床形状の変化
(Richardson, Simons and Haushild より)

表—1.1 石狩川, 岩見沢大橋

 $d_m = 0.356 \text{ cm}$

No.	Q (m^3/sec)	V (m/sec)	R (m)	$I \times 1,000$	Regime		
					(1)	(2)	(3)
1	1,812	1.38	3.63	0.360	A	R, D	R, D
2	1,590	1.37	6.23	0.370	A	R, D	R, D
3	1,444	1.34	6.29	0.378	A	R, D	R, D
4	1,196	1.42	5.00	0.286	A	R, D	R, D
5	1,138	1.45	4.67	0.291	A	R, D	R, D
6	962	1.32	4.34	0.286	A	R, D	R, D
7	921	1.28	4.29	0.286	A	R, D	R, D
8	781	1.27	3.70	0.290	A	R, D	R, D
9	519	1.17	2.68	0.300	T	R, D	R, D
10	419	0.94	2.68	0.300	T	R, D	R, D
11	375	0.98	2.38	0.400	T	R, D	R, D
12	337	0.94	2.24	0.400	T	R, D	R, D
13	299	0.96	1.87	0.420	T	R, D	R, D
14	315	0.94	2.07	0.429	T	R, D	R, D
15	289	0.93	2.04	0.325	T	R, D	R, D
16	281	0.95	1.94	0.420	T	R, D	R, D
17	239	0.88	1.84	0.402	T	R, D	R, D
18	278	1.17	1.50	0.286	T	R, D	R, D
19	265	0.96	1.82	0.400	T	R, D	R, D
20	224	0.82	1.74	0.325	T	R, D	R, D
21	215	0.85	1.65	0.300	T	R, D	R, D
22	211	0.76	1.77	0.325	T	R, D	R, D
23	199	0.81	1.60	0.400	T	R, D	R, D
24	195	0.88	1.57	0.400	T	R, D	R, D
25	179	0.77	1.52	0.400	T	R, D	R, D
26	166	0.82	1.39	0.420	T	R, D	R, D
27	142	0.74	1.31	0.430	T	R, D	R, D

表—1.2 十 勝 川, 帯 広

 $d_m = 2.15\text{cm}$

No.	Q (m^3/sec)	V (m/sec)	R (m)	$I \times 1,000$	Regime		
					(1)	(2)	(3)
1	757	2.75	2.95	1.200	—	T	R, D
2	753	2.60	3.06	1.300	—	T	R, D
3	743	2.67	3.00	1.300	—	T	R, D
4	736	2.82	2.83	1.200	—	T	R, D
5	491	2.38	2.26	1.200	—	T	R, D
6	482	2.50	2.13	1.200	—	T	R, D
7	472	2.45	2.13	1.200	—	T	R, D
8	368	2.01	2.14	0.500	—	T	N
9	356	1.96	2.01	1.650	—	T	R, D
10	351	1.94	2.01	1.650	—	T	R, D
11	318	1.91	1.96	0.400	—	T	N
12	276	1.73	1.81	0.200	—	—	N
13	153	1.31	1.70	0.100	—	—	N
14	152	1.34	1.67	0.200	—	—	N
15	128	1.16	1.62	0.100	—	—	N
16	123	1.19	1.59	0.200	—	—	N
17	122	1.12	1.40	0.100	—	—	N
18	119	1.17	1.57	0.250	—	—	N
19	111	1.09	1.56	0.700	—	—	N
20	107	1.01	1.32	0.200	—	—	N
21	106	1.09	1.54	0.100	—	—	N
22	96.5	1.04	1.38	0.100	—	—	N
23	96.3	1.02	1.13	0.200	—	—	N
24	84.7	1.00	1.35	0.100	—	—	N
25	80.7	0.87	1.52	0.150	—	—	N
26	80.0	0.87	1.47	0.230	—	—	N
27	73.4	0.82	1.50	0.300	—	—	N
28	69.2	0.78	1.48	1.650	—	—	N
29	64.5	0.72	1.52	0.070	—	—	N
30	54.6	0.66	1.41	0.200	—	—	N
31	49.8	0.64	1.35	0.050	—	—	N
32	48.5	0.62	1.35	0.150	—	—	N

表—1.3 利 別 川, 利 別

 $d_m = 0.81 \text{ cm}$

No.	Q (m^3/sec)	V (m/sec)	R (m)	$I \times 1,000$	Regime		
					(1)	(2)	(3)
1	565	2.07	2.80	0.500	N	T	R, D
2	537	2.01	2.75	0.500	N	T	R, D
3	462	2.07	2.29	0.400	N	T	R, D
4	279	1.61	1.78	0.300	N	T	N
5	218	1.59	1.40	4.695	—	R, D	T
6	188	1.58	1.22	1.000	N	T	R, D
7	182	1.51	1.24	0.500	N	T	N
8	145	1.35	1.15	1.000	N	T	R, D
9	140	1.47	0.97	0.800	N	T	R, D
10	135	1.35	1.02	0.333	N	T	N
11	123	1.16	1.65	0.800	N	R, D	R, D
12	123	1.23	1.08	0.900	N	T	R, D
13	92.7	1.20	1.16	0.700	N	T	R, D
14	89.4	0.96	1.88	1.200	—	R, D	R, D
15	86.7	1.18	1.09	0.400	N	T	N
16	73.2	1.01	1.22	0.400	N	T	N
17	54.4	0.81	0.97	0.500	N	R, D	N
18	53.4	0.93	0.99	0.300	N	T	N
19	53.0	0.98	0.81	0.901	N	T	R, D
20	37.9	0.66	0.84	0.500	N	R, D	N
21	18.1	0.55	0.58	0.300	—	—	N
22	17.3	0.59	0.48	0.600	N	T	N
23	17.1	0.96	0.71	0.200	—	—	N
24	15.7	0.80	0.59	0.300	—	—	N
25	12.6	0.62	0.74	0.800	N	R, D	N
26	12.5	0.67	0.58	0.400	—	—	N

表—1.4 常 呂 川, 北 見

 $d_m = 0.356 \text{ cm}$

No.	Q (m^3/sec)	V (m/sec)	R (m)	$I \times 1,000$	Regime		
					(1)	(2)	(3)
1	638	3.86	2.20	2.778	—	A	N
2	491	3.73	1.96	2.778	—	A	N
3	384	3.00	1.87	3.333	—	A	N
4	332	3.30	1.59	2.778	—	A	N
5	304	3.05	1.60	2.778	—	A	N
6	248	2.81	1.40	2.778	—	—	N
7	232	2.58	1.31	2.404	—	—	N
8	208	2.64	1.52	2.778	—	A	N
9	76.5	1.26	0.92	2.398	—	—	—
10	73.6	1.27	0.91	4.255	—	—	—
11	55.0	0.93	0.92	2.398	—	—	—
12	46.5	1.05	0.70	2.421	—	—	—
13	44.1	0.99	0.70	1.600	—	—	—
14	30.2	0.80	0.59	2.381	—	—	—
15	29.8	0.79	0.60	2.950	—	—	—
16	27.7	0.89	0.49	2.564	—	—	—
17	12.6	0.49	0.40	1.621	—	—	—

表—1.5 天 塩 川, 天 塩 大 橋

 $d_m = 0.120\text{cm}$

No.	Q (m^3/sec)	V (m/sec)	R (m)	I $\times 1,000$	Regime		
					(1)	(2)	(3)
1	2,043	2.19	7.76	0.220	A	R, D	R, D
2	1,689	2.05	7.36	0.120	A	R, D	R, D
3	1,635	2.00	7.18	0.0682	T	R, D	R, D
4	1,573	1.87	7.09	0.160	A	R, D	R, D
5	1,182	1.65	6.66	0.200	A	R, D	R, D
6	1,118	1.60	0.54	0.131	A	R, D	R, D
7	1,056	1.65	5.93	0.140	A	R, D	R, D
8	870	1.18	5.83	0.050	D	R, D	R, D
9	851	1.35	6.02	0.150	A	R, D	R, D
10	679	1.12	5.99	0.090	T	R, D	R, D
11	643	1.09	5.64	0.120	T	R, D	R, D
12	622	1.08	5.43	0.050	D	R, D	R, D
13	601	1.05	5.44	0.220	A	R, D	R, D
14	567	1.01	5.36	0.190	A	R, D	R, D
15	557	1.03	4.68	0.250	A	R, D	R, D
16	535	1.01	5.11	0.180	A	R, D	R, D
17	444	0.79	4.74	0.132	T	R, D	R, D
18	432	0.79	5.40	0.050	D	R, D	R, D
19	395	0.74	5.21	0.080	T	R, D	R, D
20	351	0.59	5.78	0.040	D	R, D	R, D
21	348	0.64	5.33	0.080	T	R, D	R, D
22	322	0.63	5.13	0.050	D	R, D	R, D
23	312	0.58	4.69	0.020	N	R, D	—
24	310	0.54	5.55	0.090	T	R, D	R, D
25	303	0.58	5.27	0.170	A	R, D	R, D
26	285	0.58	4.71	0.080	T	R, D	R, D

2. Regime の判定

Regime とは、河床砂の移動に伴う河床形状の諸相を表わすものであり、一般的には次の5つの分類がなされている。

すなわち、

- 1) No Motion
- 2) Ripples
- 3) Dune
- 4) Transition
- 5) Antidune

これらは、図—5のように説明される。河床形状は、河床勾配、流量、水路断面、河床材料などによって変化するが、粗度係数はその変化によっても大きく影響され、河床のそれぞれの状態に対して粗度は特徴的に変化を示すことが研究されている。したがって粗度係数の推定に当たって、Regime を判定することは重要な要素となる。Regime を水理量から推定する方法はいくつか提案されているが、ここでは次の3つの方法によって主要な観測所での Regime を推定してみる。

- 1) $u_* / w_o \sim u_* d_m / \nu$ Regime Criterion
- 2) $v^2 / s.g.d \sim F_r$ Regime Criterion
- 3) $I/s \sim R/d$ Regime Criterion

ここに $s = \zeta_s / \zeta - 1$ である。

観測資料には、水温の測定がなされていないので、沈

降速度は鶴見公式を、動粘性係数 ν は0.01を使用した。

分類結果は表—1および図—6のようである。

表—1にみるように、観測所によっては、3つの方法によって推定される Regime がまったく違うところがある。全般的にみて Garde, Raju による(3)の方法が最も穏当な推定を与えているようである。しかし実際の Regime の観測資料がないため判定はできない。実際の河床形状を観察することは非常に困難なことであるが、これらの分類法が主として室内実験に基づいて提案されたものであるので、実際の河川の観察からも検証する必要がある。

表中、一印はデータが検討された図の範囲外におちる場合であり、ここでは考察からはずした、A; Antidunes, R_s•D; Ripples and Dunes, T; Transition, N-No motion である。

3. Garde & Raju の方法

Garde と Rang Raju は、Regime に応じて次のような抵抗法則を提案している。

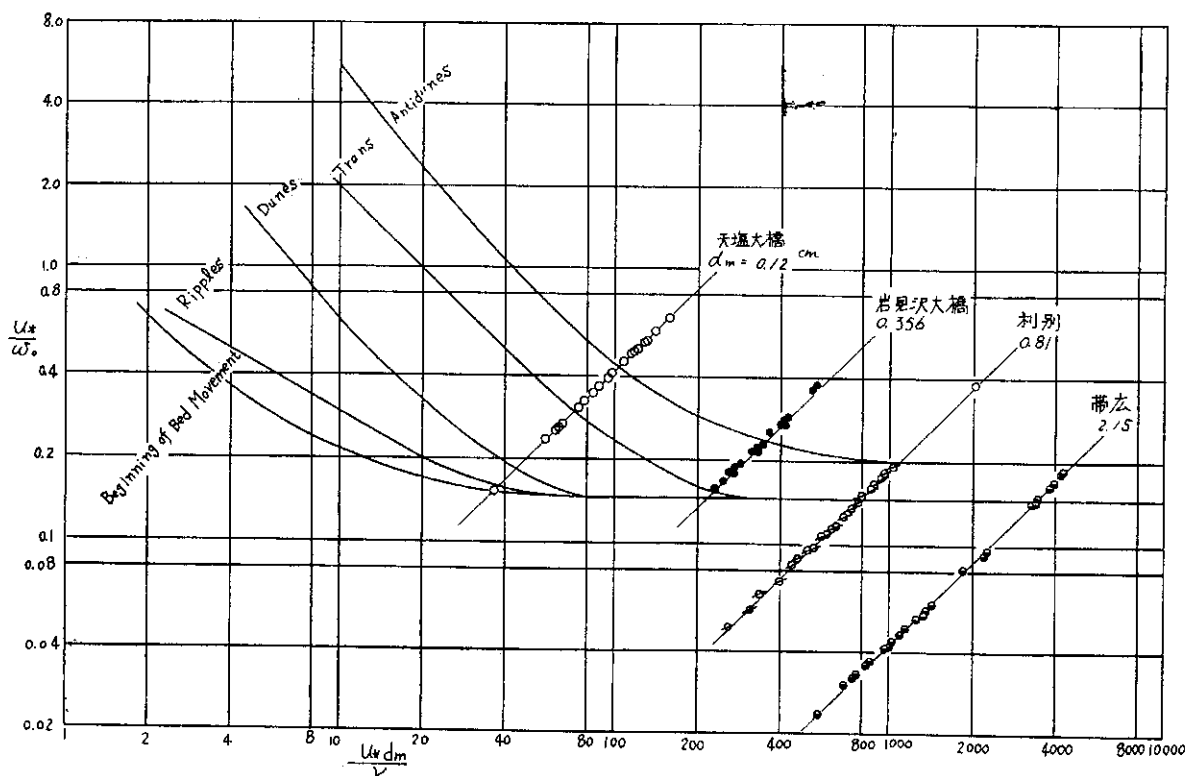
$$\frac{v}{\sqrt{\frac{dy_s}{\zeta} d}} = K \left(\frac{R}{d} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{I}{\frac{dy_s}{y}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$K = 7.66$ no motion

$K = 2.9 \sim 7.66$ Ripples, Dunes and Transition

$K = 6.0$ Antidunes

ここに $dy_s = y_s - y$, y_s , y ; それぞれ土粒子、水の単



図—6.1 $u_* / w_o \sim u_* d_m / \nu$ Regime Criterion

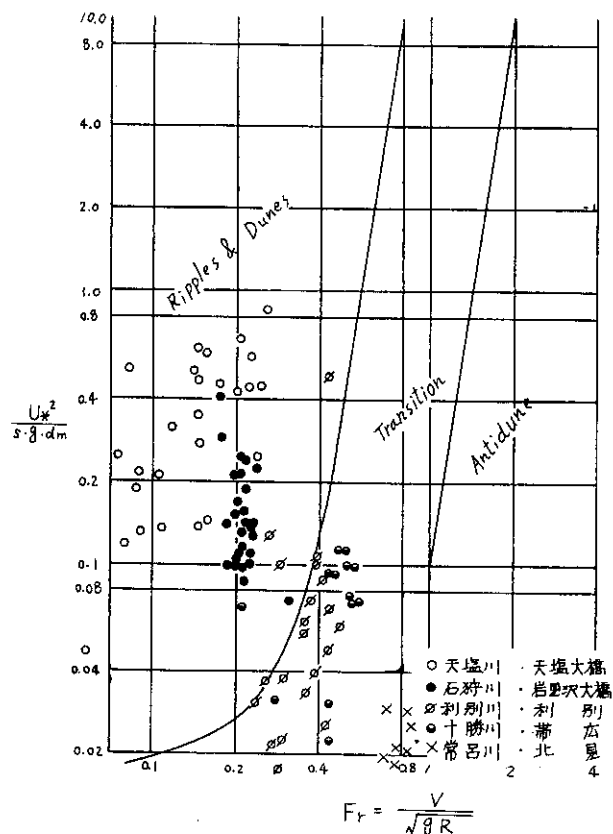


図-6.2 $U_*^2/s \cdot g \cdot d_m \sim Fr$ Regime Criterion

位体積重量, d ; 粒径である。

すなわち, 図-6.3の Regime Criterion で Regime を判定し, 図-7.1あるいは7.2 中の曲線によって平均流速 v を読みとることができる。

ここでは, 実測のデータから, 図-6.3により Regime を判定し, 図-7の縦軸と横軸の値を計算して, no motion の場合を図-7.1に, Ripples and Dunes の場合を図-7.2にプロットした。ここに用いたデータは, 石狩川・石狩大橋, 岩見沢大橋, 奈井江大橋, 橋本町, 伏古, 十勝川・茂岩, 帯広, 天塩川・天塩大橋, 間寒別橋, 常呂川・北見, 上川沿, 利別川・利別, 沙流川・平取である。これらのデータには, Antiduneと判定されるものはなかった。

図をみるとともに分散はかなり大きい, 大体線上にのっているようであるが, no motion と判定されたものでも Ripples and Dunes の範囲におちるものがあり計算から推定されるものと実際とは, かなり差のあることを示している。

4. 航空写真の解析結果の考察

出水時の航空写真により表面流速を読みとり, これと水深との関係について考察してみる。

マンニングの公式を変形すると,

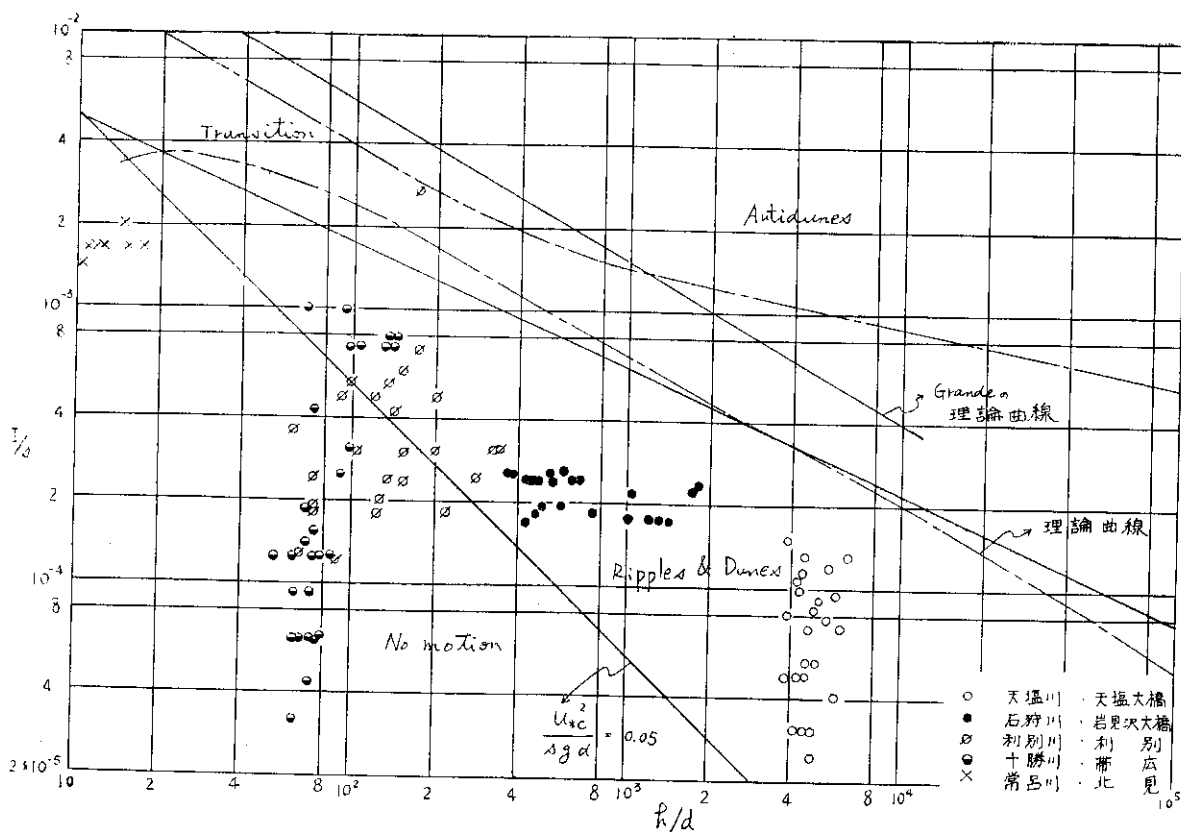


図-6.3 $1/s \sim h/d$ Regime Criterion

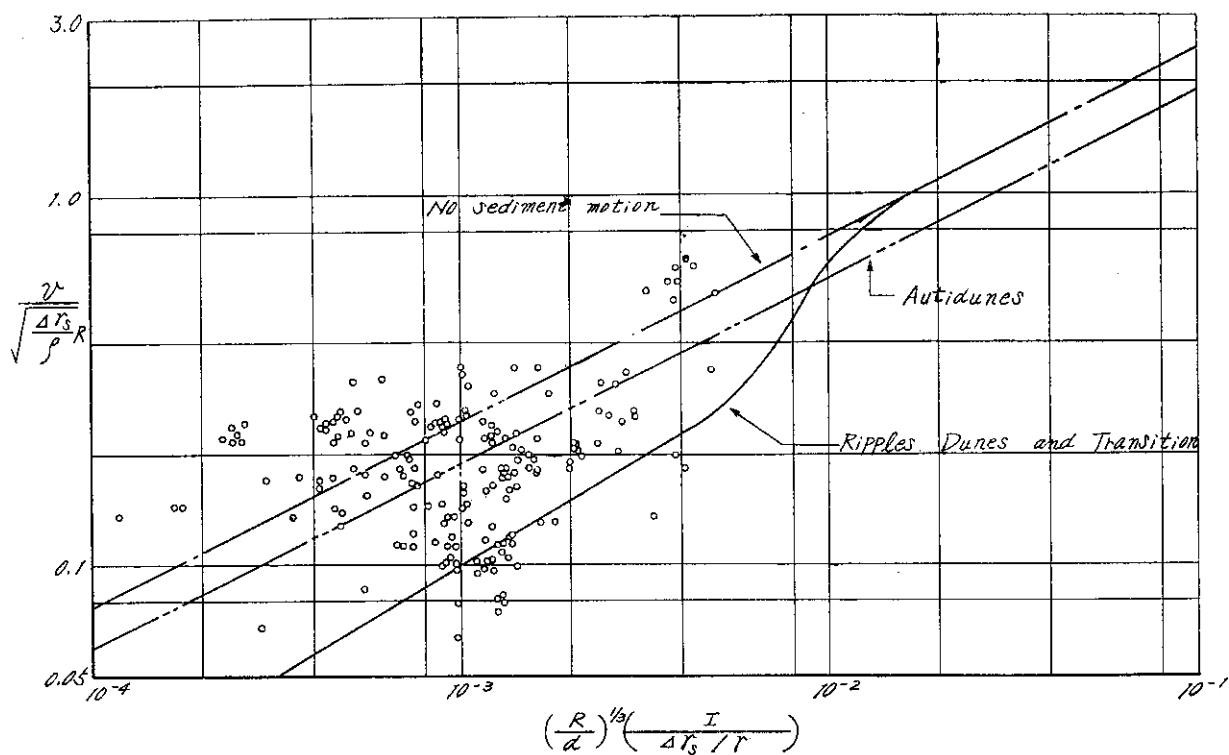


図-7.1 Garde & Raju の方法 (No motionの 場合)

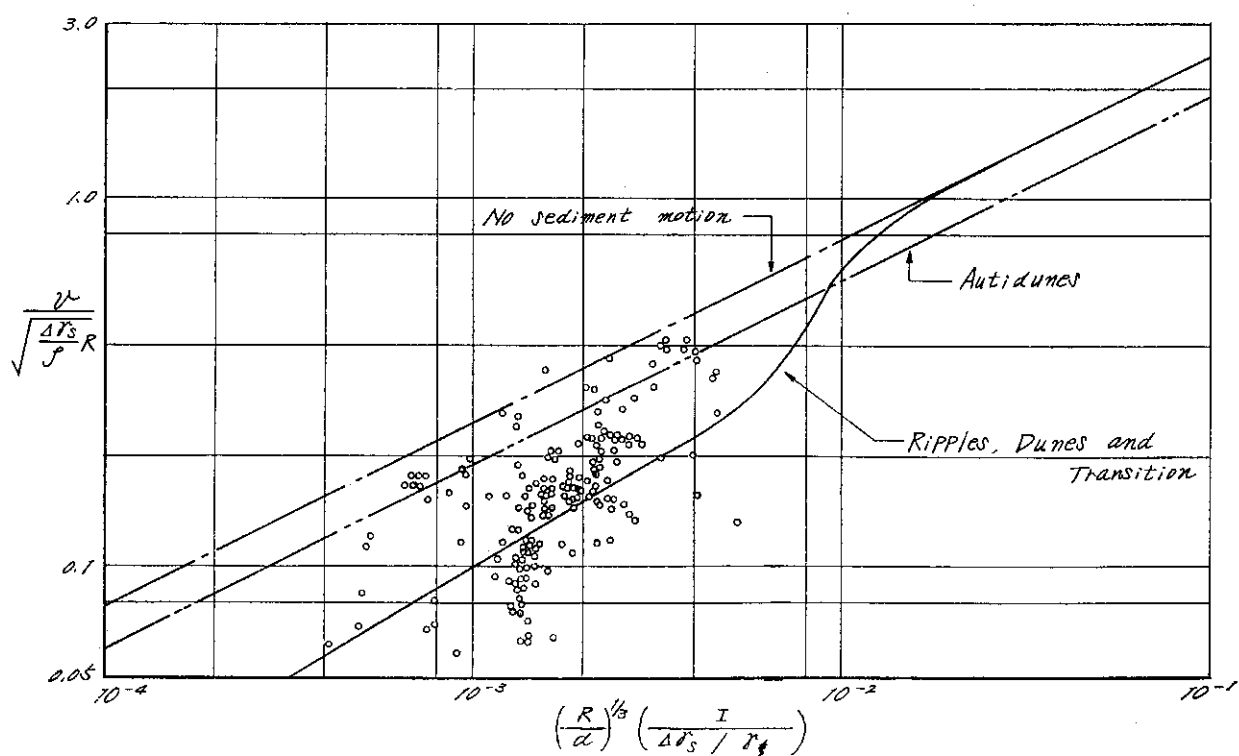


図-7.2 Garde & Raju の方法 (Ripples & Dunes の場合)

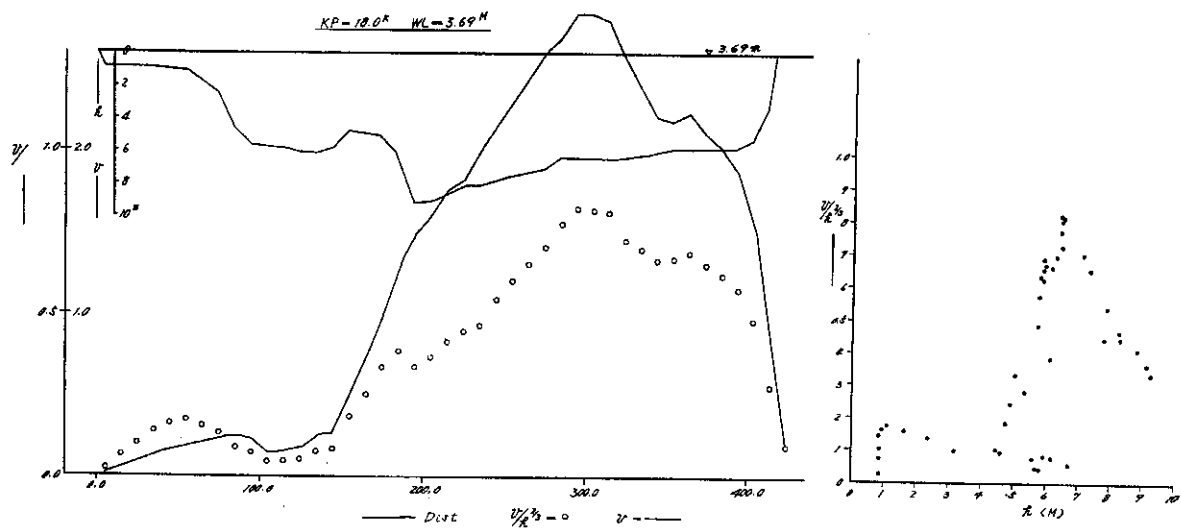


図-8.1 表面流速と水深の関係 (石狩川 18.0K)

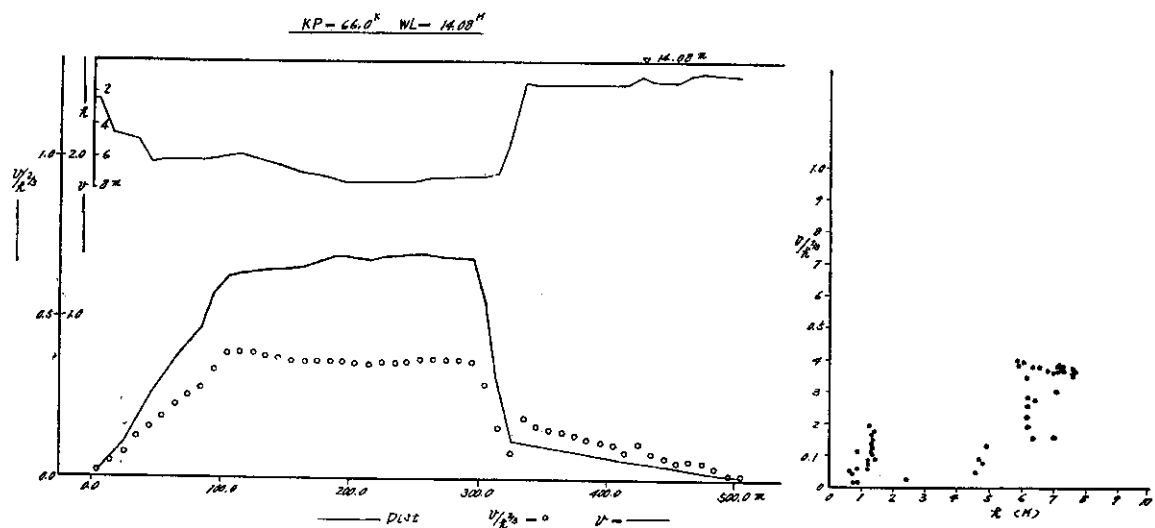


図-8.2 表面流速と水深の関係 (石狩川 66.0K)

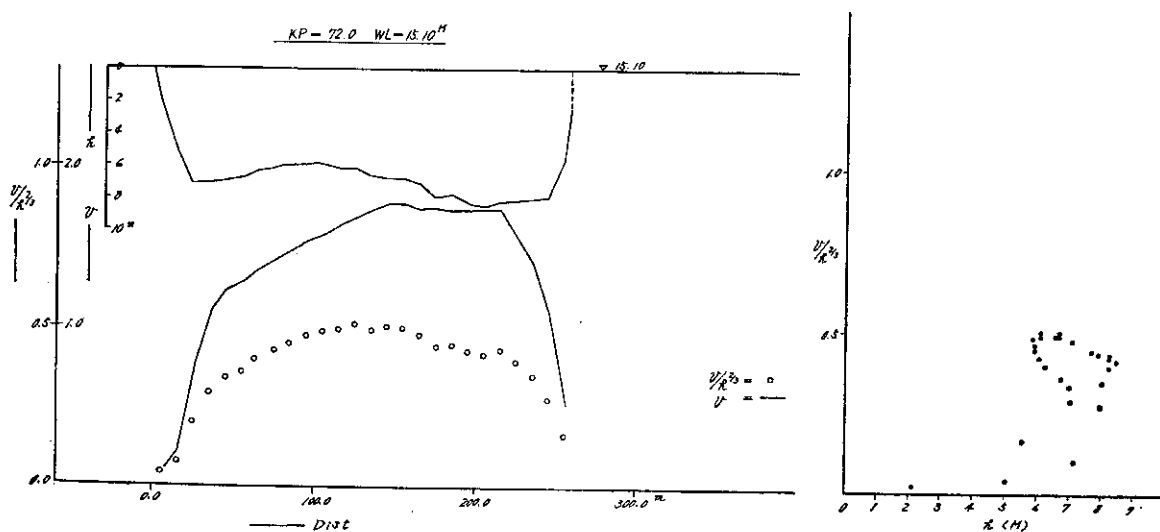
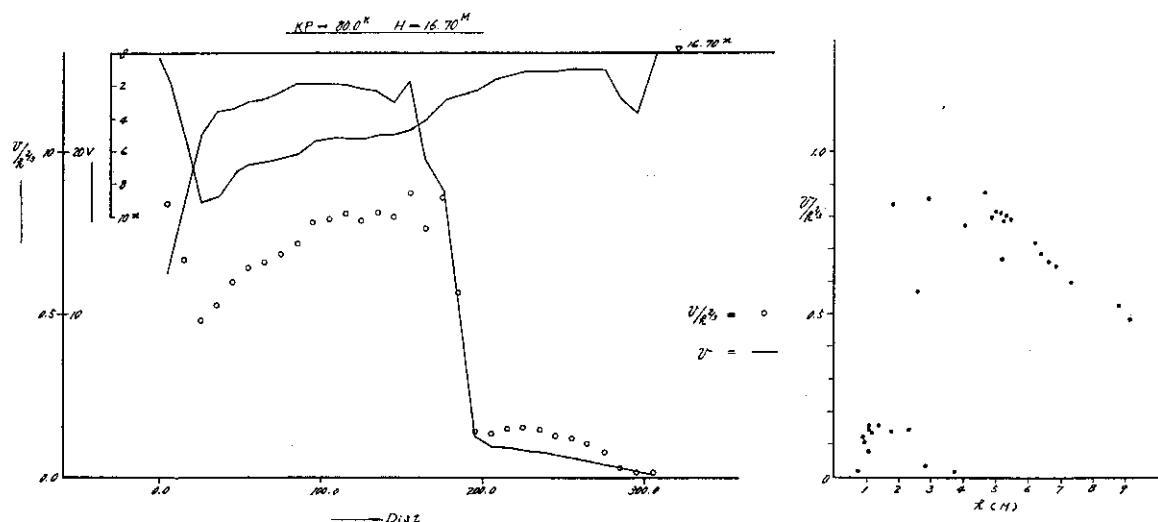


図-8.3 表面流速と水深の関係 (石狩川 72.0K)



図—8.4 表面流速と水深の関係（石狩川 80.0K）

$$\frac{I^{1/2}}{n} = \frac{v}{h^{2/3}}$$

となり、ここで I が断面内であまり変化しないものとし、表面流速 v' と平均流速 v に断面内で一次の関係が仮定できれば、

$$\frac{v'}{h^{2/3}} \propto \frac{1}{n}$$

となる。

$v'/h^{2/3}$ と h の関係を昭和41年の石狩川融雪洪水の航空写真解析結果よりプロットしてみると、図—8.1～8.4のようになる。66Kと80Kの断面は複断面であるが、高水敷と低水敷ではっきり点が分れており、粗度の違いがわかる。18K, 72Kの断面では流心の位置において、 $v'/h^{2/3}$ の値が大きくなっており、勾配などの影響が大きいものと考えられる。これらのことは、他の断面についても一般的にいえることである。

5. $n \sim R$ あるいは $R \sim v/h^{2/3}$ の整理

マンニングの平均流速公式から逆算される n についての整理は従来も行なわれてきたが、ここでは多くの観測所について概観する意味で、 $R \sim n$ および $R \sim v/h^{2/3}$ の整理を行なってみた。図—9は道内の観測所における観測結果をプロットしたものである。これらは観測所ごとにそれぞれの特徴をもっているため観測所ごとの local な要素を考慮に入れて傾向を把握しなければならないであろう。

6. むすび

(1) 既往の諸研究の検証結果では、点の分散が一般に大であるので、資料のふり分けを行ない再度検討する必要がある。

(2) Regime の判定規準の既往の方法では Garde, Rang Rajuの方法が適合性に富むようである。しかし実測がないのでこの方面からも検証しなければならない。

(3) 航測写真の解析結果では高水敷と低水敷で $v'/h^{2/3}$ の値に差があり、したがって粗度も明らかに違っている

ことが確かめられた。

(4) 粗度係数と径深の関係については、観測所ごとにそれぞれの特徴が出ているが、その local な要素を考えて検討してみる必要がある。

報文の初めに述べたように、この研究は、北海道開発局として、全道的に実施したものである。初年度としての成果概要を報告するに当たり、本局河川3課をはじめ、各建設部において、研究実施を担当された方々に深甚の謝意を表する次第である。

(文責 小森保数, 小川芳昭)

参考文献

- 1) Garde, Rang Raju : Resistance Relationships for Alluvial Channels Flow, Proc. of A.S.C.E. HY4, July 1966

記号の説明

- v : 平均流速
- n : マニングの粗度係数
- R : 径深
- κ : カルマン常数
- g : 重力の加速度
- $\tau_* : \tau_o / (\zeta_s - \zeta_f) \cdot g \cdot d_m$
- w : 土粒子の沈降速度
- $s : (\zeta_s / \zeta_f - 1) \approx 1.65$
- h : 水深
- I : 水面勾配
- $u_* : \text{マサツ速度} = \sqrt{gRI}$
- A_r : 積分常数項
- k_s : 砂粒相当粗度
- d_m : 河床砂平均粒径
- ζ_s, ζ_f : 砂粒および水の密度
- ν : 動粘性係数
- y_s, y : 砂粒および水の単位体積重量
- v' : 表面流速

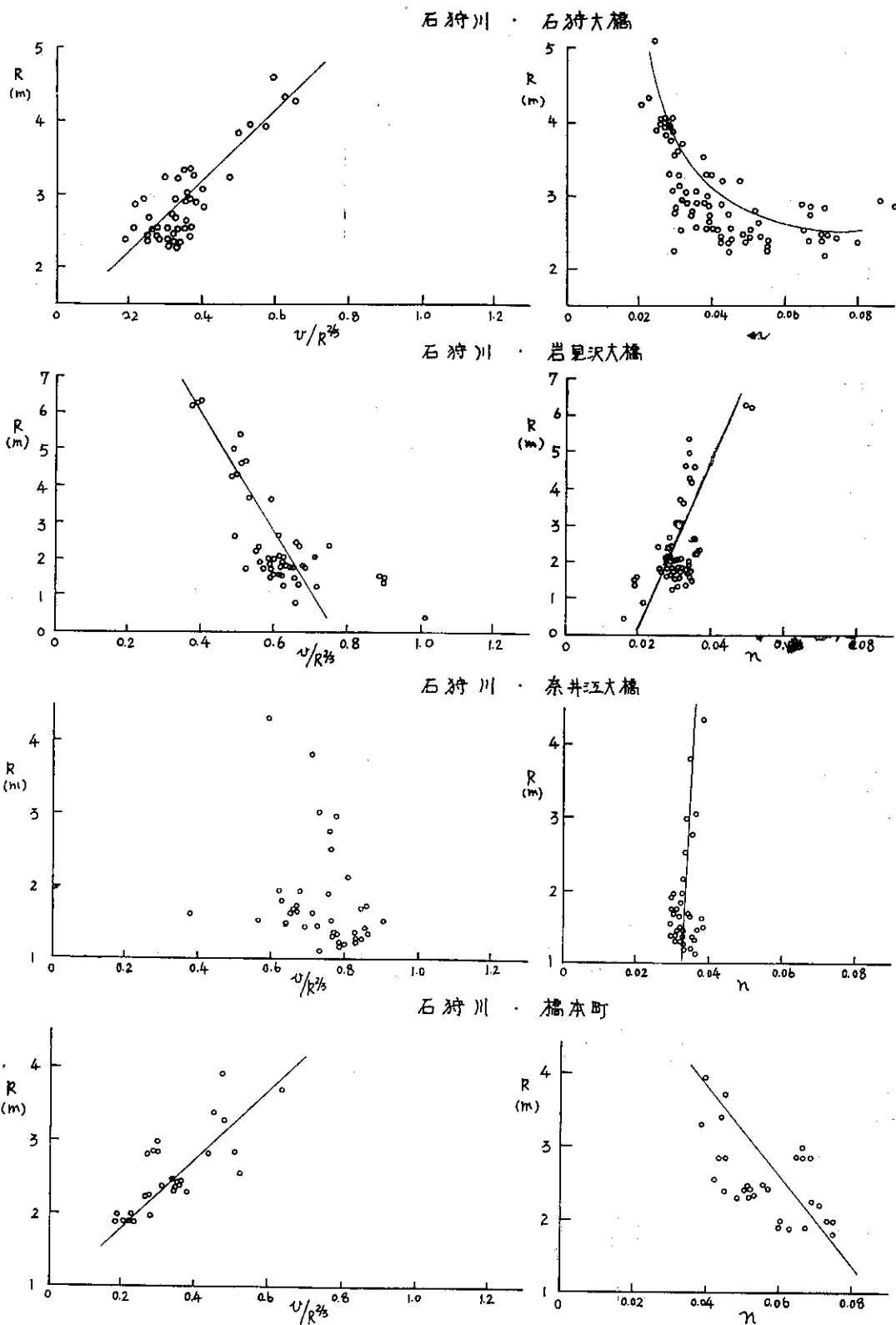
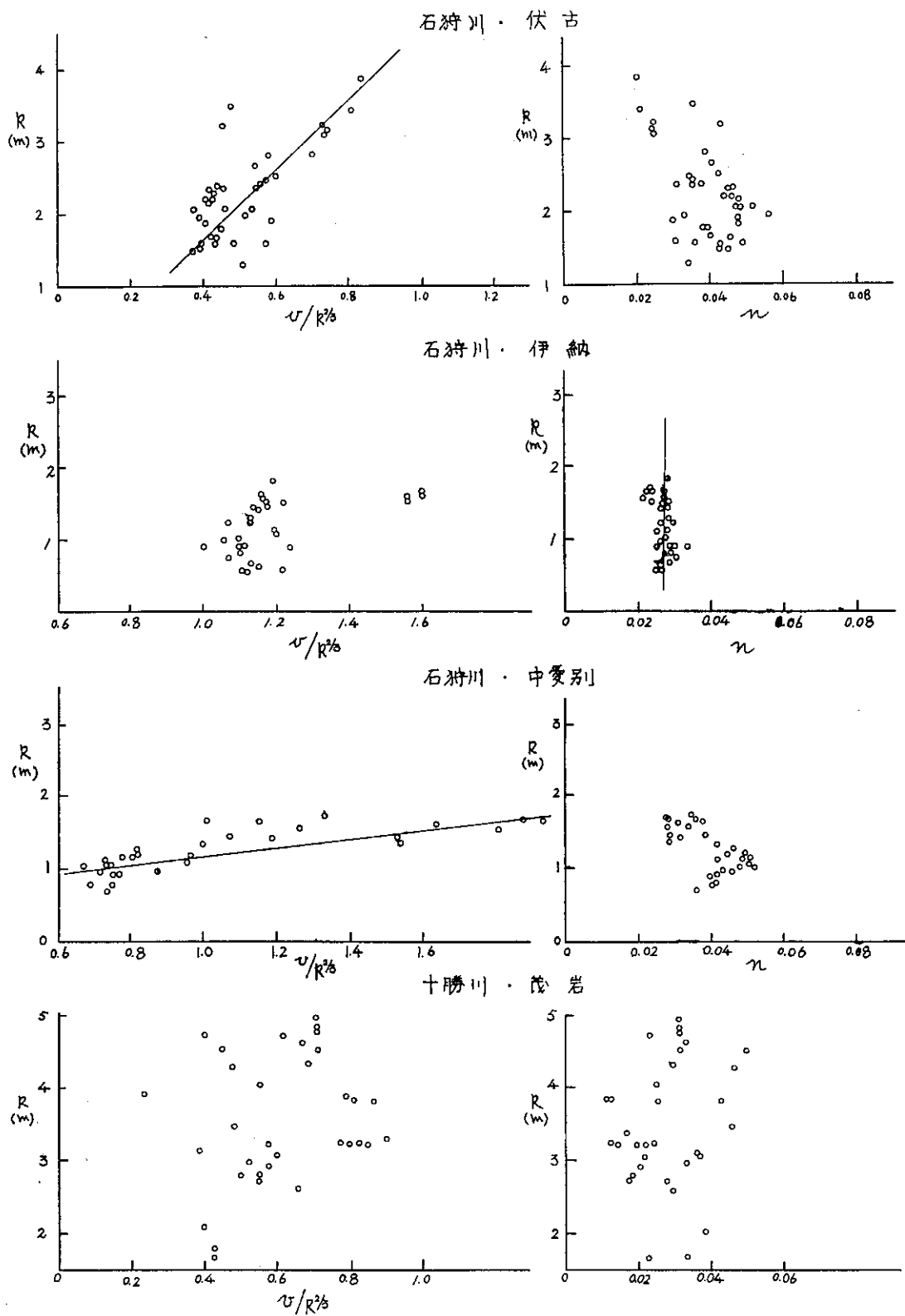
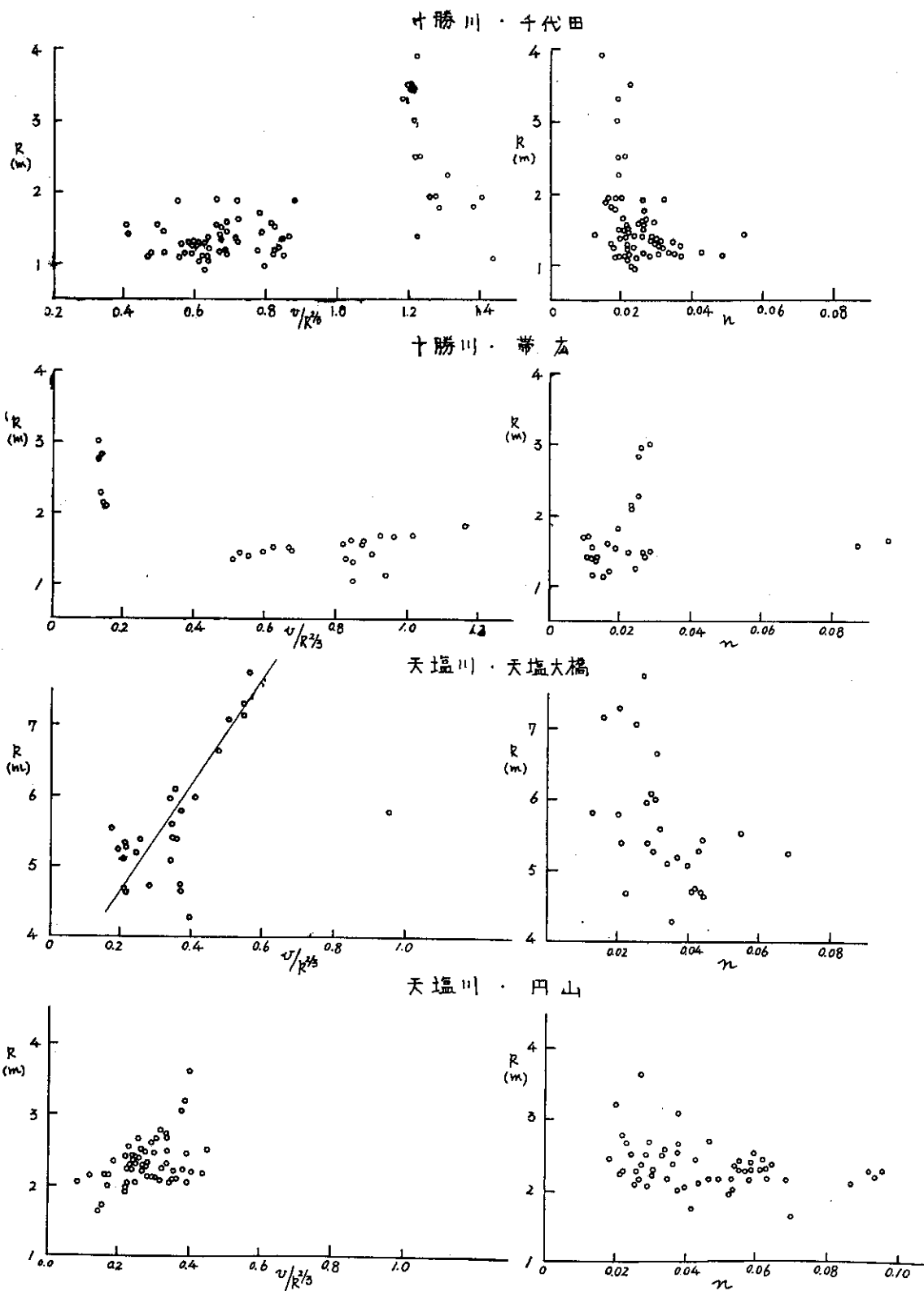


図-9.1 $R \sim v/R^{2/3}$, $n \sim R$



図—9.2 $R \sim v/R^{1/2}$, $n \sim R$



図—9.3 $R \sim v/R^{2/3}$, $n \sim R$

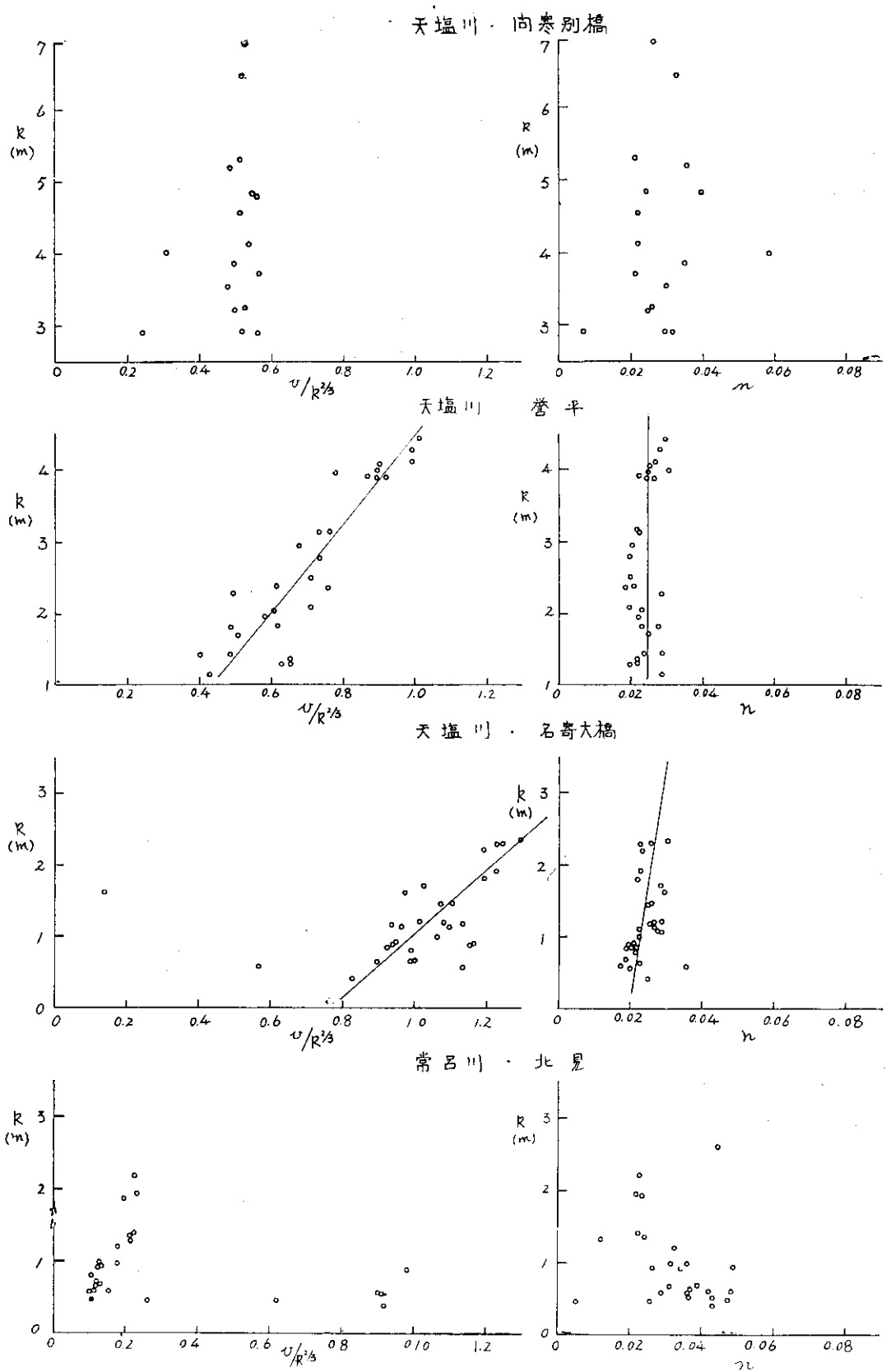
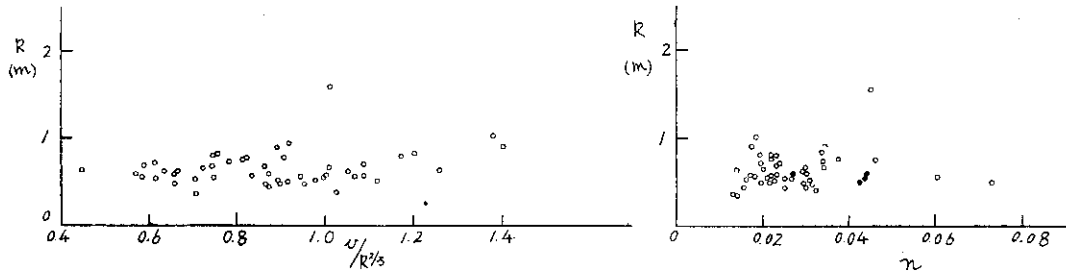
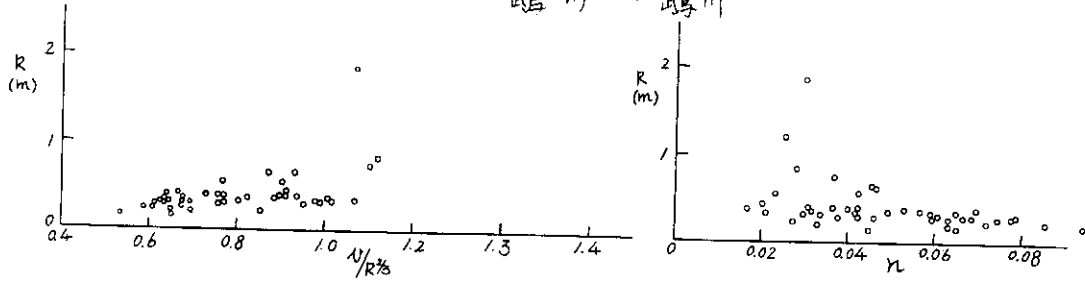


図-9.4 $R \sim v/R^{2/3}$, $n \sim R$

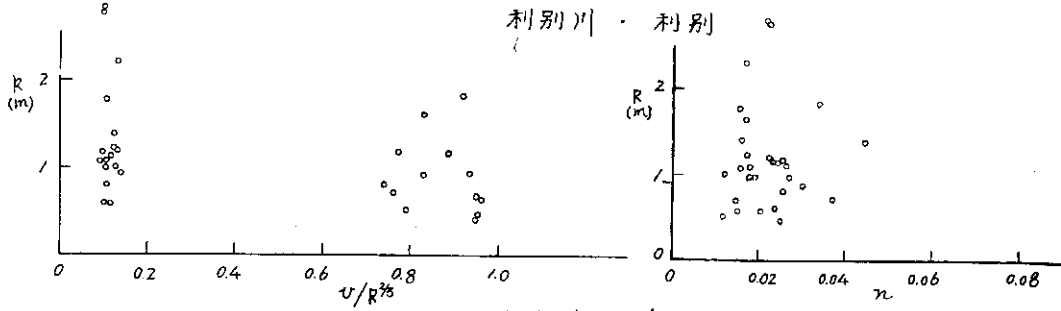
沙流川・平取



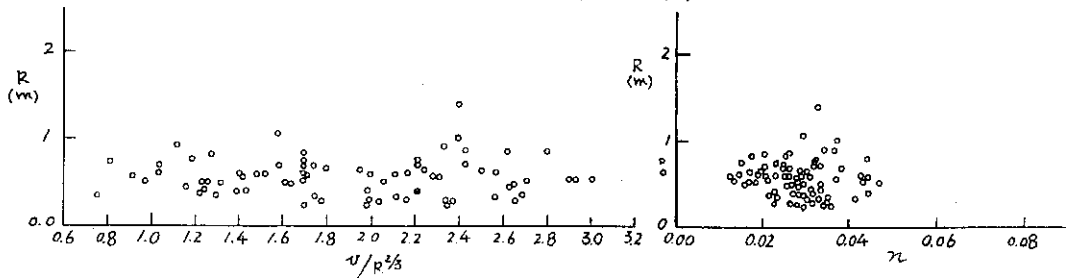
武雄川・武雄



利別川・利別



札内川・南帯橋



音更川・音更

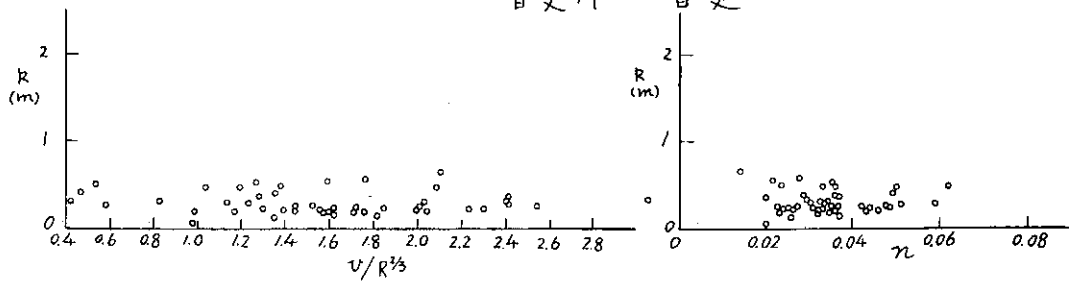
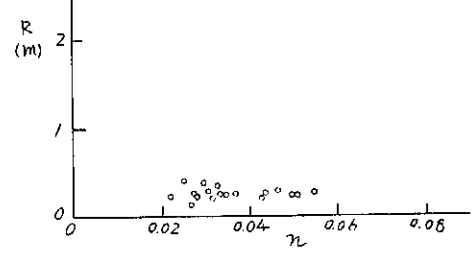
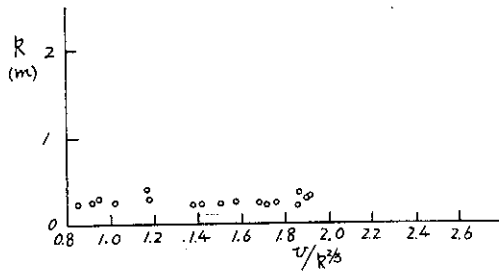
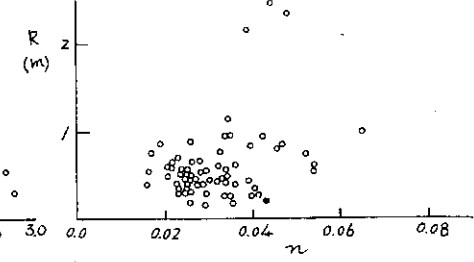
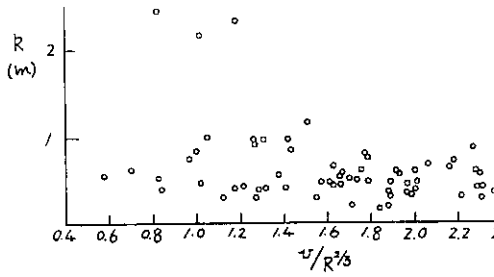


図-9.5 $R \sim v/R^{2/3}$, $n \sim R$

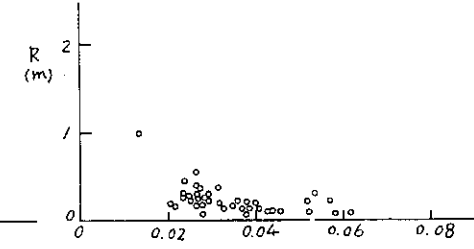
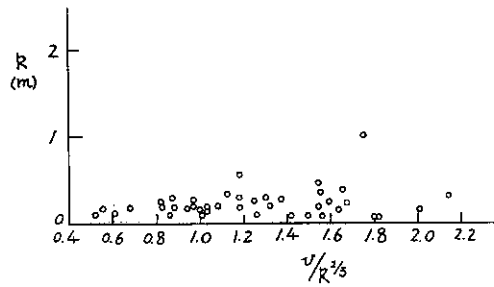
佐賀川・新得



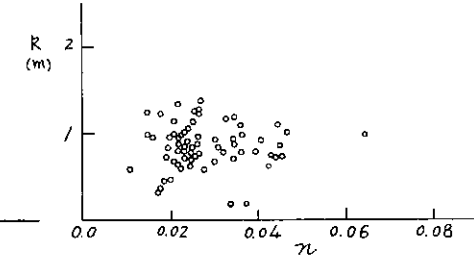
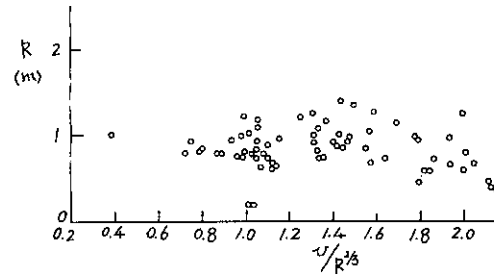
札内川・才二大川橋



生花苗川・新宮橋



十勝川・芽室太



十勝川・新清橋

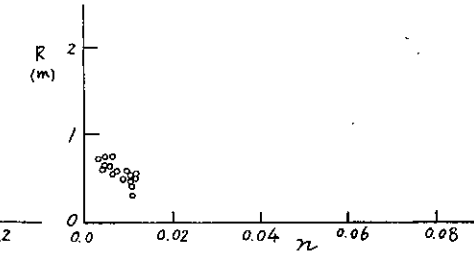
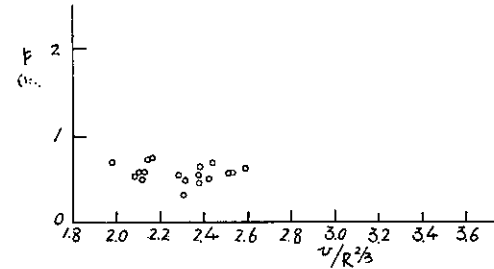
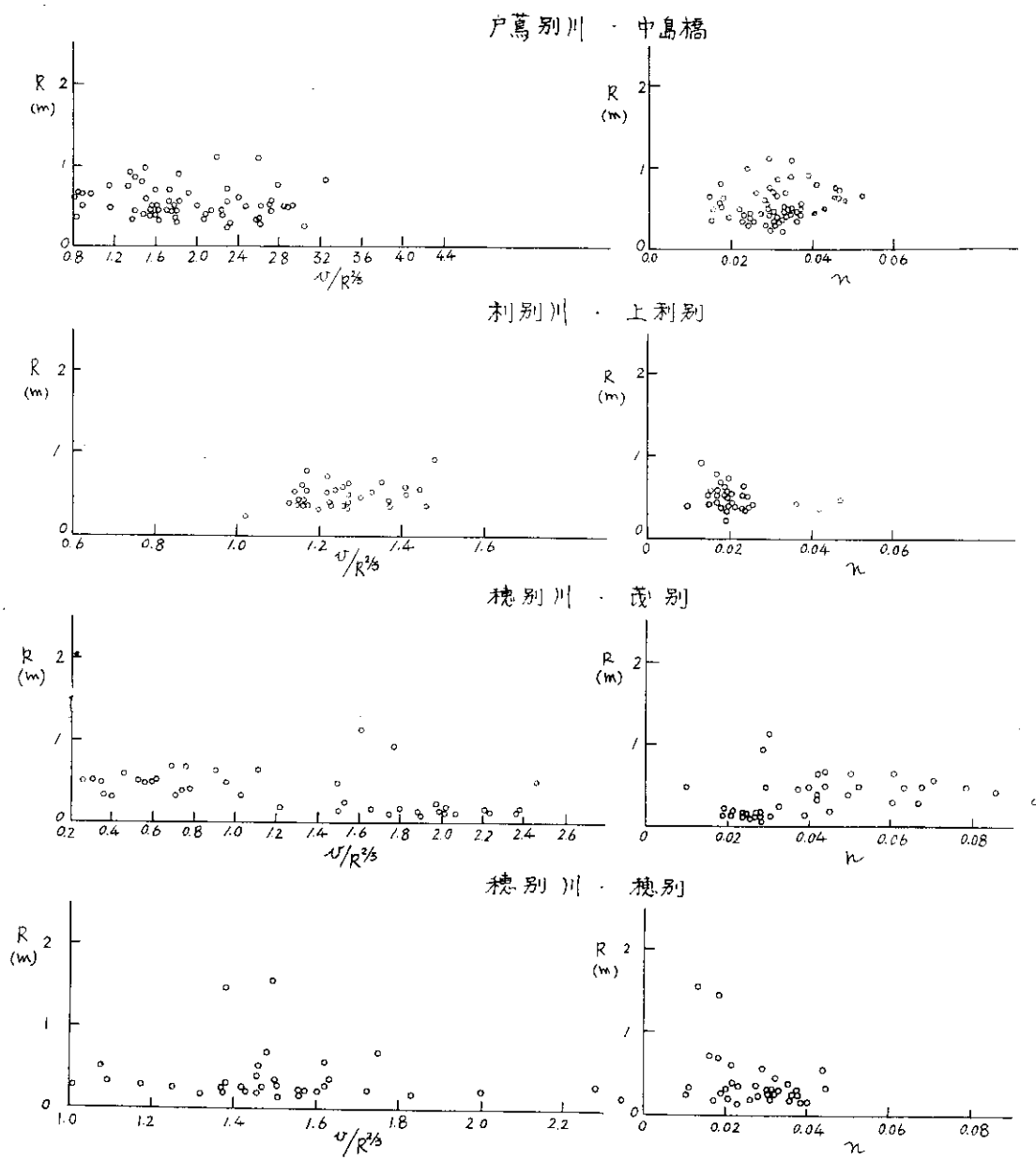


図-9.6 $R \sim v/R^{2/3}$, $n \sim R$



図—9.7 $R \sim v/R^{2/3}$, $n \sim R$

職 役 員 の 移 動

昭和46年1月1日付

新 役 職
土壌保全研究室副室長

旧 役 職
土壌保全研究室主任研究員

氏 名
矢 野 義 治

昭和46年1月30日発行 編輯兼 村木義男
発行人

発行所 北海道開発局土木試験所
062 札幌市平岸無番地
電話 (841) 1111 (代表)

印刷所 日栄舎印刷株式会社
札幌市菊水西町10丁目
電話 (811) 6161 (代表)