

徳島大学工学部 正員 ○杉 尾 捨三郎

全 上 正員 岡 部 健 士

概 要：移動床水路実験において使用された河床材料が自然砂で、かつ不均一な粒度分布をもつ場合には、単に平均粒径のみならず、その粒度分布曲線の形が河床形態と粗度に影響することを、主として W.E.S. および安芸博士の実験結果を解析して述べたものである。

(1) 均一砂に対する河床形態と粗度

「移動床流れにおける河床形態と粗度」に関し、土木学会水理委員会内に設けられた研究小委員会⁽¹⁾において熱心な検討がなされ、現時点までの成果が明確に示されている。このうち岸・黒木の方法は流速係数 $\varphi_0 (= V/\tau_*)$ を各河床形態ごとに、掃流に関する無次元量 $\tau_* (= u_*^2/(s_s-1)gd)$ と $\frac{R}{d}$ との関数であると考え、主として Simons ら、Gilbert および佐藤・吉川・芦田らの諸実験資料を用いて関数形を決定したものである。図-1 は $R/d=1000$ の場合に対する $\varphi_0 \sim \tau_*$ 関係図を示し、式の番号は原著のままを用いてある。例えば図中の Eq.(29), Eq.(30) はそれぞれ次式を示す。

砂堆河床Ⅰ、 $\varphi_0 = \frac{8}{f} = 2.4 \left(\frac{R}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \tau_*^{-\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (Eq. 29)$

砂堆河床Ⅱ、 $\varphi_0 = 8.9 \dots\dots\dots (Eq. 30)$

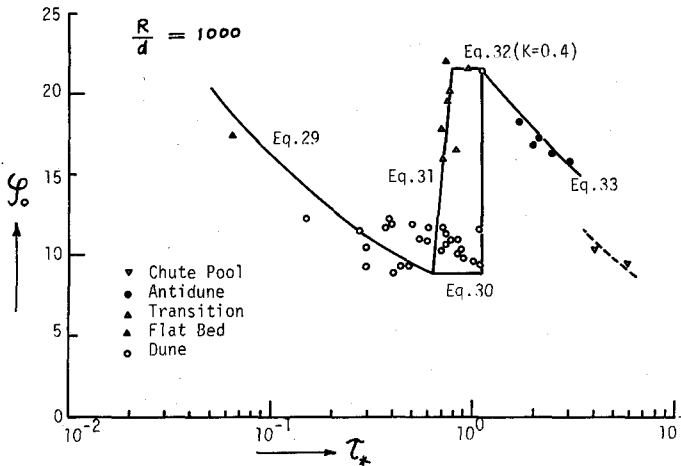


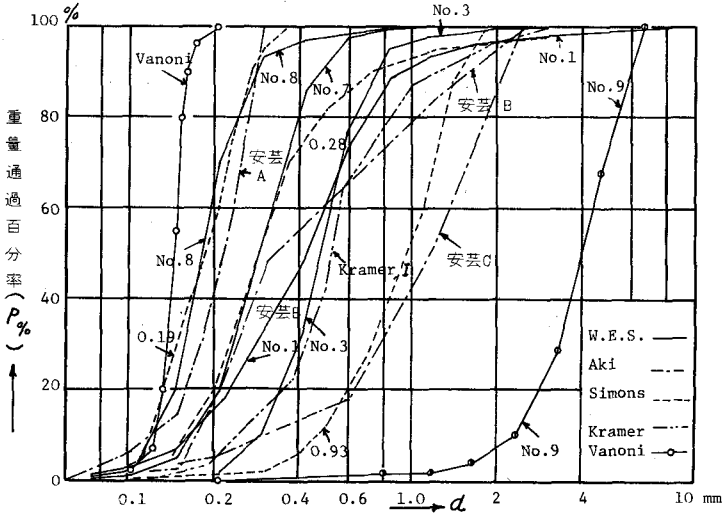
図-1 φ_0 と τ_* との関係図 (岸・黒木)

これらの方法は種々な室内実験に対して良好な適合性を示すと考えられ、さらに両氏はこれを石狩川の二地点、および Rio Grande の観測で認められた φ_0 の履歴現象の説明に対しても良好な結果を得たと述べている。さて上述の解析に用いられた実験砂の多くは均一粒であり、従つて得られた諸実験式は、ほぼ均一砂とみなしうる水路または河川に対して最もよく適合すると思われる。一方 W.E.S. の 9 種の実験や安芸博士の実験では粒度範囲の大きい自然砂が使用され、かつ砂れんの発生・消長などが詳細に観測されているので、本文では主として両者の資料を中心として検討すること

にした。

(2) 不均一砂を用いた諸実験

図-2 は自然砂を水路床材料として用いた各種実験の粒度分布曲線を示す。安芸 A 種は 0.3 mm 以下の細砂、B 種は自然河川によく見られるタイプで最大径は 2.5 mm である。C 種は B 種と同質であるが、細粒を少くし大粒を多くなるように配合され、最大径は 2.5 mm であつた。W.E.S. の 9 種の実験のうち No.1 砂は最も粒度変動巾が大で、最大 9.42 mm である。No.3 ~ No.8 までは平均粒径 $d_m = 0.205 \sim 0.525$ mm で細粗粒が適度に混和している。No.9 は最も粗大な砂れきで構成されている。Simons らの 0.19 mm 砂の最大粒径は 0.3 mm で安芸 A にちかい細砂、0.93 mm の砂は安芸 C に類似しているが、0.6 mm 以下の細砂の混入割合は C 種よりかなり小さい。Kramer は 3 種の砂を用いたが代表例として I 種の粒度分布を図示する。これは W.E.S. No.4 ~ No.8 のように細粗が適度に混和しているが、大体粒径大で、最大粒は 5 mm であつた。Vanoni らの実験砂はきわめて小さく、大きい方でさえ最大粒径は 0.2 mm であつた。



研究者	砂種	平均粒径 (mm)	最大粒径 (mm)
安 芸	A	0.221	0.30
	B	0.700	2.50
	C	1.220	2.50
W.E.S.	No.1	0.586	9.42
	No.3	0.525	3.33
	No.4	0.506	2.362
	No.7	0.310	1.17
	No.8	0.205	1.17
	No.9	4.077	6.68
Simons	0.19	0.19	0.35
	0.28	0.28	3.0
	0.45	0.45	1.40
	0.93	0.93	1.80
Kramer	I	0.53	5.0
Vanoni	No.1	0.146	0.208

図-2 各種実験砂と粒度分布の比較

(3) 河床形態と粗度との関係

図-3 は流速係数 $\phi_0 = V/V_*$ を縦軸に、掃流関数 $\tau_* = \bar{v}_*^2 / (\phi_0 \rho - 1) g d$ を横軸にとつて各種実験結果を描いたものである。ここに R_b は側壁の影響を除いた径深で、 V_* は全抵抗をまとめて示す方法によつてゐる。まず安芸 A では、 Q の増加に伴つて河床形態は「平滑→移動開始→砂れん発達終了（以後砂れん）」のように変化する。安芸 B は、「平滑→移動開始→砂れん発達終了→砂れん崩れ始め→砂れん消滅」という経過をたどる特異なもので、砂れん消滅と共に河床は平滑となり、砂粒ははげしく流送される。このときの砂面は長い洲となつた。W.E.S. の No.3 ~ No.8 のものでは Q の増大と共に砂面状態は「smooth → local ripples → general ripples」となり、砂移動状態は「none → weak → medium → general」となつた。図-3 によれば、安芸 A、W.E.S. No.7、8 の砂れんに対する ϕ_0 は 1.0 以下であり、平滑面から突然砂れんに移行する特徴をもつ。安芸 A では τ_* の増加と共に ϕ_0 は

徐々に増すが、*W.E.S.* の場合には増加が速やかで、その終端ではかなり粗度が小さくなる。特に N_6 4 ではこの傾向が顕著で、もし仮にさらに Q が増加していたならば、安芸 B に類似した $\varphi_0 \sim \tau_*$ 図が得られたのではないかと推定される。砂れんを発生していない状態における φ_0 の値は $\varphi_0 = 1.4 \sim 2.0$ 程度であつた (図-3)。なお、*W.E.S.* N_6 1 では描点の大部分は「smooth $\rightarrow$ local riffle $\rightarrow$ general rif.」と観測されているが、general riffles のとき $\varphi_0 = 1.6.6 \sim 1.8.6$ である考慮すると、このときの河床形態は外観的に砂れんと見られるが、図-1の砂堆河床 II とは全く異質の河床波であると考えるのが至当であろう。杉尾はレジム型の平均流速式を媒介として河床形態を分類した際、上述の河床を第3群の *Transition* に含め、第1群の *Ripple* 床と区別している。

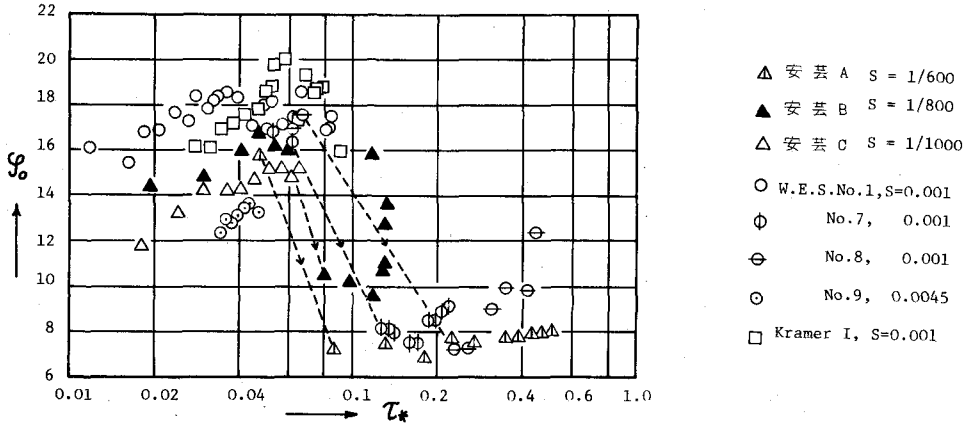
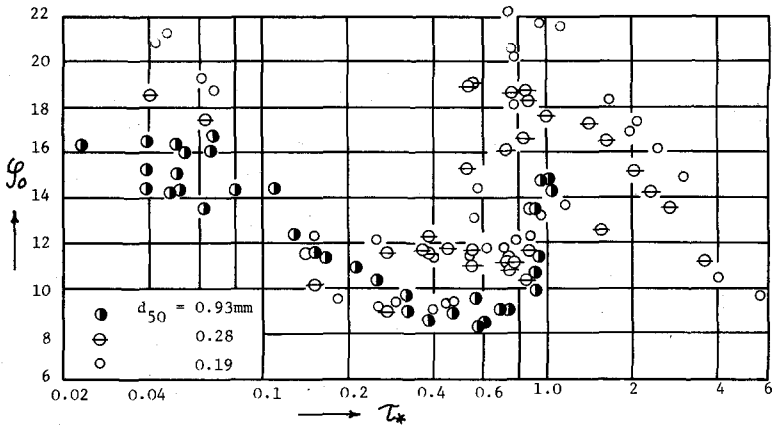


図-3 φ_0 と τ_* との関係 (*W. E. S.* と安芸実験)

Kramer の実験では砂面形態を「smooth — weak riffles — medium riffles — excessive riffles」として示し、砂移動については「weak — medium — general rif」で区別している。しかも excessive riffles の大部分では $\varphi_0 > 1.5.9$ であるから、 N_6 1 砂と類似している。 N_6 9 砂では砂の移動後流砂量を測定し得たもののみを図-3に点描してあるが、河床形態は Q の小さい3個は smooth のこりは scours と記されている。しかも $\varphi_0 = 1.2.8 \sim 1.3.8$ であるから、かなり平滑な砂洲となると考えられる。*Simons* らの実験では水路こう配 S を 0.000055 $\sim$ 0.01 の範囲内で変化させて広範囲の河床面形態を発生させることに成功したのは衆知の事実であるから略する。

図-4 φ_0 と τ_* との関係。
(*Simons* の資料)



(4) 混合粒の河床上の粗度と河床面形態

以上の自然砂を用いた実験にみられるように、砂面の粗度と河床面形態との関係はかなり複雑で、均一砂の場合のように単に平均粒径と掃流力との関係を検討するだけでは理解し難く、ここに河床材料の粒度分布の影響を考える必要があり、この方が水温変化の効果よりも大きいことも予想される。

すでにLiu は砂れんの発生条件を検討した結果、2種の無次元量 U_* / w_s と $U_* d_m / \nu$ とが重要な要素であることを示し、図-5のように砂れん発生開始曲線を示した。同図上には筆者が計算した結果も点描してある。さてYalin は砂れんと砂堆の区別について(1)の条件を提案した。土木学会小委員会で定めた両者の境界は $\frac{U_* d}{\nu} = 10$ であった。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Yalin} ; \frac{U_* d}{\nu} > 20 \text{ 砂堆、} \quad \frac{U_* d}{\nu} < 20 \text{ 砂れん} \dots\dots\dots (1) \\ \text{小委員会} ; \frac{U_* d}{\nu} > 10 \text{ 砂堆、} \quad \frac{U_* d}{\nu} < 10 \text{ 砂れん} \dots\dots\dots (2) \end{array} \right.$$

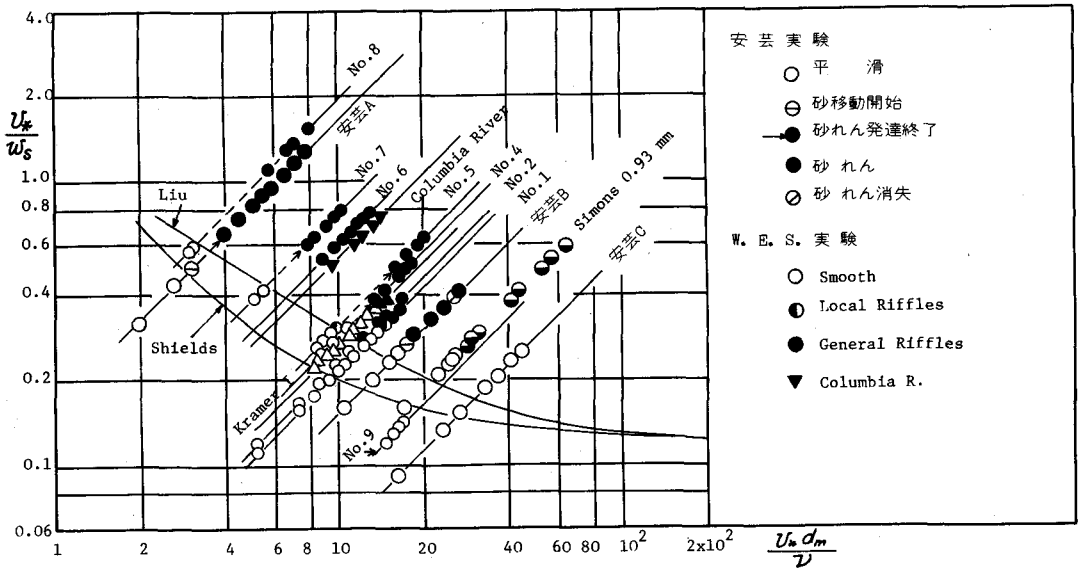


図-4 砂れん発生開始曲線 (Liu)

前者の区分によれば、W.E.S. No. 4, 5, 6は砂れんとなるが、後者の区分によれば砂堆と判定される。No. 7, 8および安芸Aは $\frac{U_* d}{\nu} < 10$ であり、(1)、(2)の砂れん条件を満たすだけでなく、(以下G.R. と略記) に対する ϕ は10以下であるから完全な砂れんである。No. 5, 6のG.R.では、 ϕ はほぼ10以下であるが、前者の $\frac{U_* d}{\nu}$ は15~22位、後者では10~14程度であるから、かなり砂れんに近いとみることができる。安芸Bの「砂れん」と観測されたものでは、 $\phi \approx 10$ であるが、 $\frac{U_* d}{\nu} = 20 \sim 28$ であるから砂れんに近い砂堆と推定できる。No. 3, 4では $\phi = 7.6 \sim 14$ 程度で $\frac{U_* d}{\nu} = 13 \sim 19$ 位であるから、砂れんから砂堆に遷移する状態を示すとみられる。しかしNo. 1 No. 2のG.R. に対する ϕ は16.1~18.6位できわめて小さい粗度を示すのが特色で、かつ $\frac{U_* d}{\nu} = 12.3 \sim 16.8$ の範囲をもつから、砂堆と見るべきであろう。以上のように $U_* d / \nu$ による区分のみでは不均一砂の河床形態は整理し難いことがわかる。

(1) 砂れんを生ずる場合

安芸 A、Simons 0.19 mm のように、砂粒の最大粒径 $d_{bM} < 0.3$ mm 程度のものは容易に $\frac{u_* d}{\nu} < 10$ の条件を満足し、最も砂れんを発生しやすい。流れの掃流力が河床の最大粒の砂をも流送できるならば砂れんは生じやすいであろう。安芸 A の場合はこれに該当するもので、与えられた摩擦速度の自乗値 $gR_b S$ の下で移動可能な最大粒径 d_M が、岩垣の限界掃流力公式から推定できるものと仮定する。⁽²⁾

$$gR_b S = u_*^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

安芸 A 砂に対し、平滑から砂れんに移行した直後の掃流力を上式から求めてみよう。いま $S=1/600$ 、 $R_b=1.978$ cm より $gR_b S=3.231$ (cm/s)²。(3)式を満たす d_M を岩垣公式から求め、 $d_M=0.58$ mm。一方河床材料の最大粒径 $d_{bM}=0.30$ mm (図-2)。∴ $d_M > d_{bM}$ となり、この段階では河床全体は容易に移動する傾向にある。またこのとき $\frac{u_* d}{\nu}=3.97$ 、 $g_0=7.18$ であつた。W.E.S. № 7, 8 では砂れんへの移行直後においては $d_M \geq d_{bM}$ であるから、河床全体は移動する状態にある。

砂 粒	Run	R_b (cm)	S	$gR_b S$ (cm/s) ²	d_M (mm)		d_{bM} (mm)	$\frac{u_* d_M}{\nu}$	g_0	河床移動
安芸A砂	2	1.978	1/600	3.231	0.58	>	0.30	3.97	7.18	全 体
	12	11.41	1/600	18.64	2.50	>	0.30	9.54	7.968	全 体

表-1 砂れんの資料 (安芸 A)

つぎに河床の最大粒径は動かないが、砂れんが発生する場合について述べよう。例えば W.E.S. № 3 では $d_M < d_{bM}$ であるから河床の最大粒は動かないが、移行直後では $g_0=9.63$ 、 $\frac{u_* d}{\nu}=14.29$ となるから、砂れんまたは砂れんに近い形態が発生している (表-2)。このように最大粒は動かなくても砂れんが発生する事実は「砂れんの発生は、河床材料のうち特に細粒の占める割合に関係がある」ことを示唆する。いま試みに 35% 粒径を基準にとり、砂れんまたは砂れんに近い状態を生じやすいもののうち d_{35} の大きい方をとれば

$$\left. \begin{array}{ll} \text{(i)} \frac{u_* d}{\nu} < 20 \text{ のとき} & d_{35} = 0.43 \text{ mm (№ 3)} \\ \text{(ii)} \frac{u_* d}{\nu} < 10 \text{ のとき} & d_{35} = 0.30 \text{ mm (№ 6)} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となり、35% 以下の粒度分布曲線が上の値より左側にあるものは砂れんを生ずる可能性がある。

研究者	砂 粒	R_b (cm)	S	$gR_b S$	d_M (mm)		d_{bM} (mm)	$\frac{u_* d_M}{\nu}$	g_0	備 考	河床移動
W.E.S.	No. 7	6.51	0.001	6.38	1.16	>	1.168	7.83	8.12	移行直後	全 体
		11.17	0.001	10.95	1.71	>	1.168	10.26	9.096	最 終	全 体
W.E.S.	No. 3	3.73	0.002	7.311	1.29	<	3.33	14.2	9.634	移行直後	部 分
		8.89	0.002	17.42	2.38	<	3.33	21.91	12.96	最 終	部 分
W.E.S.	No. 8	8.04	0.001	7.879	1.36	>	1.168	5.75	7.23	移行直後	全 体
		15.41	0.001	15.10	2.15	>	1.168	7.97	12.35	最 終	全 体
安 芸	B 槽	7.626	1/800	9.342	1.53	<	2.50	21.4	10.41	発達終了	部 分
		11.22	1/800	11.22	1.74	<	2.50	25.95	15.70	消 滅	部 分

表-2 移行直後の砂れんの資料

№ 7, 8, 安芸 B の実験について、上述と同様な方法で砂れんに移行した直後、および最終段階の諸量を計算した結果が表-2 にまとめられている。

さて砂れんが Q の増大と共に変形するかどうかは、50% 以上の部分を占める大粒の分布形に左右されるようである。河床の最大粒径がかなり大きいか、または 50% 以上の部分の粒度曲線が右にふく

らんでいるほど、大小の砂粒の混合が自動的に適切に行なわれ、大粒の砂の空隙は小粒の砂によつて埋められ、粗度が自然に小さくなり ϕ_0 は増加すると考えられる。安芸Bの粒度曲線は $p < 47\%$ の部分では W.E.S.のNo. 7, 8 とほとんど同一であるが、 $p > 47\%$ の部分では大粒の占める割合ははるかに大であるため砂粒の再配置が速に行なわれ、図-4に示すように粗度の小さい *flat* な河床を作りやすいものと理解される。

(II) 砂れんを生じない場合

移行する以前の状態のように、掃流力が極端に小さい間は勿論砂れんは発生しない(図-3)。実験を通じて全く平滑であつたのは安芸0であつた。No. 1, 2では *General Riffles* が生じたが、 $\phi_0 \geq 17$ であり、従来の $\phi_0 \leq 10$ に相当する砂れんとは異質であつたと考えられる。No. 9では $\frac{u_* d}{\nu} > 200$ にも達し、砂表面は *Scours* と記録されている。*Kramer* のI種砂の ϕ_0 はきわめて大で、平滑面に対する粗度に近い。表-3にはこれら砂れんを生じない実験諸量がまとめて示されている。

研究者	砂 種	R_b (cm)	S	$R_b S$ (cm/s) ²	d_M (mm)	d_{bM} (mm)	$\frac{u_* d}{\nu}$	ϕ_0	河 床 面 状 態
安 芸	0 種	1.798 13.55	0.001 0.001	1.762 13.28	0.108 1.97	< <	2.50 2.50	16.19 44.46	平 滑
W.E.S.	No. 1	6.490 8.169	0.001 0.001	6.360 8.005	1.16 1.38	< <	9.42 9.42	14.78 15.58	General Riffles General Riffles
W.E.S.	No. 9	5.89 6.96	0.0045 0.0045	25.97 30.69	3.23 3.62	< <	6.66 6.66	207.8 225.6	Scours Scours
Kramer	No. I	7.164 8.116	0.001 0.001	7.021 7.954	1.25 1.34	< <	5.0 5.0	14.0 14.9	Excessive Riffles Excessive Riffles

表-3 砂れんを発生しない場合の資料

これらの実験砂の粒度分布図をみると、最大粒径 d_{bM} が極端に大きいか、または大粒の含有率が大きいものが多い。No. 1の砂では 0.4 mm 以下が 46% を占めるから砂れんを一時的に発生しそうに思われるが、河床最大粒径 $d_{bM} = 9.42\text{ mm}$ がきわめて大きいため、砂が移動中に細・粗粒の配置換が適切に行なわれ、粗度のきわめて小さい *flat* な面となるものと考えられる (表-3)。

(5) 結 論

不均一粒砂に対する砂れん発生条件としては $u_* d/\nu$ が重要な示標であることは勿論であるが、さらに粒度分布曲線の形や性質が河床面状態・粗度につよく影響するようである。

- 1) 最大粒径が 0.3 mm 以下の自然砂床は、きわめて容易に砂れんを発生する(安芸A)。
- 2) 50% 以下の細粒砂の混入が砂れん発生と関係があるようで、粒度分布曲線が(4)に示す曲線の左側に存在する場合が特に発生しやすい。
- 3) 上に述べた範囲内に粒度分布曲線が存在しても、最大粒径が大きいか、または粗粒の混入が多い場合には、小流量で一度砂れんが発生することがあつても、流量増加と共に砂れんから砂堆に変形し、粗度が小さくなることもある(安芸B、W.E.S. No. 4など)。
- 4) 最大粒径が特に大きいか、粗粒部の含有率が特に大きいときは、砂れんを全く発生しないことがある(W.E.S. No. 1, 2, 安芸0など)。

参 考 文 献

(1) 水理委員会研究小委員会：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年2月。

(2) 杉尾・佐々木・岡部：移動床抵抗における移行現象；第16回水理講演会講演集、1972, 2。