

移動床抵抗における移行現象

徳島大学工学部 ○杉 尾 捨三郎

佐々木 英 治

岡 部 健 士

1. 概 説：自然河川および実験水路の流れの河床抵抗にみられる代表的な4種の移行現象について述べ、さらに種々な移行現象を生ずるための水理学的条件を、自然河川の実測値を例にとつて考究したものである。

2. 移動床上の平均流速公式⁽¹⁾：図-1は沖積水路および河川の流れについて $V-R^2S$ 関係をまとめて示している。図の左半分は実験、右半分は河川資料である。これによると移動床上の流れの平均流速 V は(1)のような指数形で大表現され、かつ3~4種の群に分類されるようで、筆者らはこれを第1群、第2群、第3群とよぶことにした。ここに R は流れの径深、 S はエネルギーこう配、また係数 K の平均値はそれぞれ54, 80, 110であつた。

$$V = K R^{0.54} S^{0.27} \quad (\text{cm/s}) \dots\dots\dots (1)$$

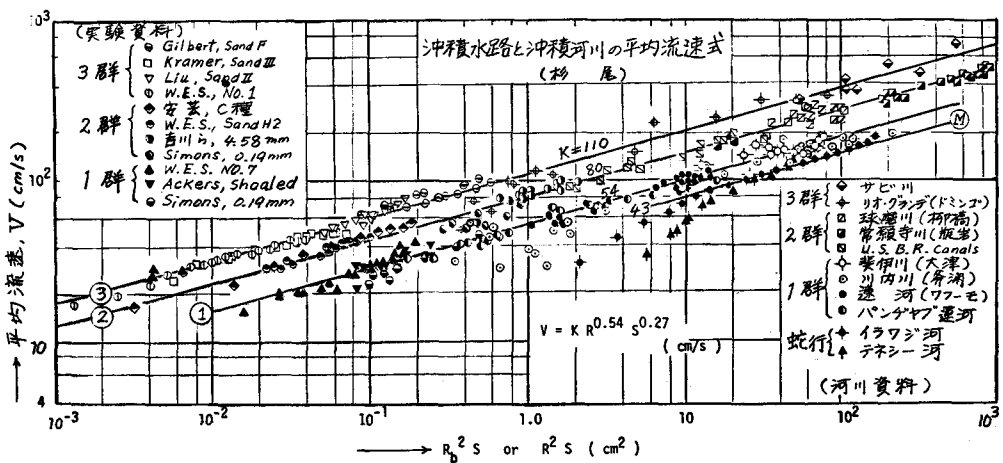


図-1 沖積水路と沖積河川の平均流速公式

河床面形態が明示された実験資料について上記の各群との関係を吟味した結果、第1群、第2群、第3群の河床面形態はほぼ Ripple, Dune および Transition または Upper Regime に相当することが明らかにされた。また図-1においてM群と記されたものはIrawaddy河およびTennessee河の古い資料⁽²⁾から得られたものであるが、流量 Q が大きい場合に限つて近似的に(1)式が成立し、このときの K の平均値は $K=43$ と推定される。これらの描点は、第1群 (Ripple河床) よりも大きい河床^(抵抗)を示しているが、この理由の一つは、上記河川が蛇行河川であることを考慮すると、流路の屈曲が余分の抵抗を与えるのではないかと推定される。

3. 移行現象⁽³⁾：

多くの沖積水路または沖積河川においては、流量 Q が増加すると一般に描点は各群ごとに大体(1)式に沿うて右方へ移動する性質がある。しかし場合によつては、流量の変化過程においてある群^(から)

他の群へ突然、または徐々に描点が移動することがあり、これを『移行』と名づけた。

(I) 移行を生じない例：

実験水路においては S を一定に維持しておき Q のみを漸次変化させる法は W. E. S., Kramer, Liu, 安芸らによつて試みられてきた。さて Kramer, Liu らの実験においては、砂面が Smooth, Lower Limit, Weak Riffle, Excessive Riffle などのように変化しても、 $V - R^2S$ 図上の描点はほぼ第 3 群の域を離れないことはすでに述べた。自然河川においては Q が増加するとき S の増加を伴うことが多いが（九州河川について椿が検討したように）、やはり $V - R^2S$ 図上の描点は (1) 式に沿うて右方に移動する傾向が認められ、図-3 に示す川内川（斧淵地点）や多くの Regime Canal はその例である。すなわち Q の増大とともに河床面凹凸の規模は大になるが、河床面形態そのものは変化しないと考えられる。

(II) 移行を生じる例：図-2 は沖積水路と沖積河川にみられる代表的な移行現象の概要を示す。

これによれば、 Q の増加とともに以下述べるような 3 種の移行が存在する。

- (1) 第 3 群から第 1 群への移行
- (2) 第 2 群から第 1 群への移行
- (3) 第 1 群から第 3 群への移行

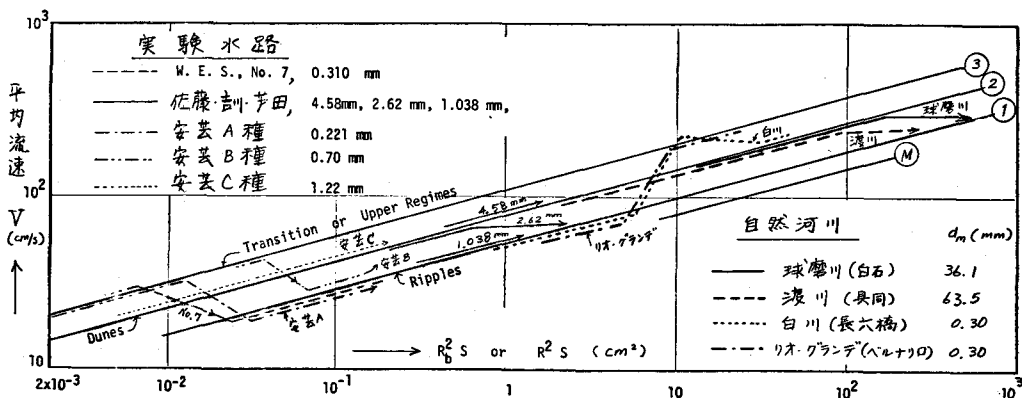


図-2 移行の代表例

(1) 第 3 群から第 1 群への移行

実験水路においてよく出現するタイプで、W. E. S. の No. 6, 7, 8 種砂、安芸の A, B 種砂がその例である。たとえば W. E. S. の No. 7 種砂に対し $S = 0.001$ の場合についてみれば、はじめ第 3 群線に沿うて描点は右方に移動していたものが、ある流量以上に達すると描点は突然第 1 群へ移行し、Ripple を生じたまま、描点は第 1 群線に沿うて移動する傾向がある。

この種の移行は自然河川ではほとんど認めることができない。その理由の一つは、実験室ではよく実験開始前に流砂面を平滑に敷き均すことができるが、河川ではこれができないためであろう。

(2) 第 2 群から第 1 群への移行

佐藤・吉川・芦田らが実施した実験のうち、 $d_g = 4.58 \text{ mm}$ と 3.78 mm に対する描点は $V - R^2S$ 図上では大体第 2 群線上を移動するが、 $d_g = 1.038 \text{ mm}$ のものは概略第 1 群の傾向を示している。

しかし、 $d_g = 2.62 \text{ mm}$ と 2.2 mm の描点は、小流量のときには第2群に、大流量になるにつれて第1群に描点が近づく傾向がみられる。すなわち Q が大になっても V はあまり変化せず、河床抵抗が徐々に変化するのが特徴である⁽³⁾。

これに類似した移行現象は自然河川においても出現し、琢磨川、渡川などの場合のように河床材料がかなり粗大な砂れきである場合に認められる。図-6は琢磨川（白石地点）における $V - R^2S$ 図を示している。

(8) 第1群から第3群への移行：この種の移行は Rio Grande, 白川の場合にみることができる。

一般に河床材料が微細砂で構成されているときに起りやすく、その変化はかなり徐々に行なわれる。この移行過程においては河床砂の一部が徐々に浮遊しはじめるので、河床抵抗の減少は河床砂の粒度配合状態と掃流力につよく影響されると思われ、描点の散在もいちぢるしい。

しかし室内実験においては、こう配 S をきわめて広範に変化させぬ限り、この種の移行を認めることは困難である。その理由は、 S を一定に維持したままでしかも第1群から第3群への移行を発生させるためには、実験設備の能力をはるかに超過する Q を与えねばならぬからであろう。

4. 移行現象の解析

実験水路の資料に現われる移行現象については、すでに筆者は第3群から第1群への移行（W. E. S.の $\#7$ 種砂）および第2群から第1群への移行（吉川らの $d_g = 2.62 \text{ mm}$ 砂）の場合に対する解析を試みた。そのとき得られた結論は、つぎのようであつた。すなわち、

「河床材料が混合粒径で構成されている場合には、掃流力により移動可能な最大粒径 d_M が、河床材料の90%粒径（ d_{90} ）をほぼ超過すれば移行現象を発生する」

という仮定を設ければ、概略の説明が可能になる。と述べた。本文では上と同様な考え方が自然河川の移行現象の解析にも適用可能であるか否かを論述しようとするものである。

(1) 移行を生じない例

九州地建が観測した川内川（斧洲地点）における29個の資料⁽⁴⁾から $V - R^2S$ 図を描いたのが図-3である。小流量の場合の描点はかなり散在するが、 $Q > 356 \text{ m}^3/\text{s}$ （ $\#26$ ）の範囲内では描点は大体第1群に沿うて移動することがわかる。まず各資料ごとに流れの掃流力に相当する gRS を計算し、さらに限界掃流力に関する岩垣の略算式⁽⁶⁾（図-4）を利用して gRS に対応する移動可能な最大粒径 d_M を推定する。さらにこの地点の河床砂れきの粒度分布図（図-5）を用い、上記の d_M に相当する粒径以下の河床材料が、河床全体に対して占める割合 $P\%$ を求める。表-1

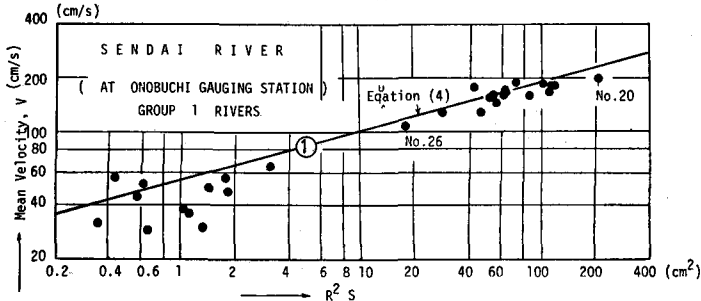
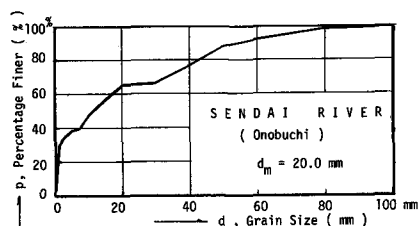


図-3 川内川の $V - R^2S$ 関係図

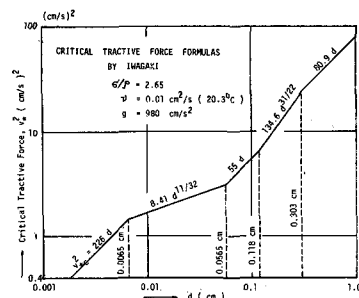
はこうして得られた計算の一部を示す。表一 / によれば、流量が最大となる底 20 における d_M は河床全体の 73% 粒径に過ぎないから、 d_{90} を動かすに足るほど掃流力は大きくなく、したがって第 1 群の抵抗を示すに止まり、移行は発生しないと判定できよう。

NO	Q (m^3/s)	R (m)	S $\times 10^4$	V (m/s)	n $\times 10^2$	R^2S (cm^2)	$V_*^2 = gRS$ (cm/s) ²	d_M (mm)	p (%)
26	355.9	2.53	2.801	1.07	2.91	17.93	69.45	8.6	45
20	1879.3	6.90	4.405	1.99	3.82	209.7	297.9	37.0	73

表一 / 川内川における移行の解析



図一 5 川内川の河床材料

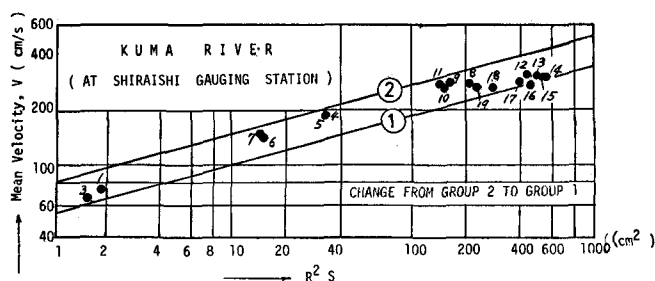


図一 4 岩垣の限界掃流力略算式

(II) 移行を生じる例

(1) 第 2 群より第 1 群への移行

図一 6 は球磨川（白石）における $V - R^2S$ 図を示す。図によれば小流量の場合の描点はほぼ第 2 群の抵抗（Dune 河床）を示すが、資料底 / 0 あたりから流量の増加とともに第 1 群への移行が認められる⁽⁵⁾。



図一 6 球磨川における $V - R^2S$ 図

表一 2 は、球磨川に対する代表的な 3 個の資料について解析した結果を示す。表によれば、資料底 7 ($Q = 283 m^3/s$) から底 11 ($Q = 1497 m^3/s$) までの範囲に対しては大体第 2 群河床、すなわち Dune 河床としての抵抗を示すが、このとき河床材料の 27~80% までの小粒

NO	Q (m^3/s)	R (m)	S $\times 10^4$	V (m/s)	n $\times 10^2$	R^2S (cm^2)	$V_*^2 = gRS$ (cm/s) ²	d_M (mm)	p (%)
7	282.9	2.11	3.195	1.46	2.0	14.22	66.06	8.2	27
11	1496.6	5.07	5.495	2.77	2.5	141.2	273.0	33.7	80
14	2555.2	7.19	10.64	3.08	3.9	550.0	749.6	92.7	90

表一 2 球磨川における移行の解析

径の砂が移動可能な状態にあると考えられる。しかし資料底 / 4 ($Q = 2555 \text{ m}^3/\text{s}$) に対しては表より $P = 90\%$ と見積られ、完全に第 / 群の抵抗を示すことになる。すなわち河床材料の 90% 程度の量が移動可能な状態になれば『移行』がおこり、河床面形態は Dune から Ripple へ徐々に変化すると考えられる。

(2) 第 / 群から第3群への移行

この種の移行は、はじめ Ripple 河床であつたものが掃流力の増加とともに河床砂の一部を浮遊させたために抵抗の減少がおこつて生ずると推定されるから、前述の 90% 粒径の移動可能の問題とは異なる。図-7は Rio Grande の Bernalillo 付近で得られた資料に対する $V - R^2S$ 図である。河床材料の粒度分析が明かでないが、 $d_m = 0.30 \text{ mm}$ であるから河床は細砂のみで構成されていることがわかる。図上の描点の散在はきわめていちぢるしいが、大体第 / 群から第3群への移行を示す。

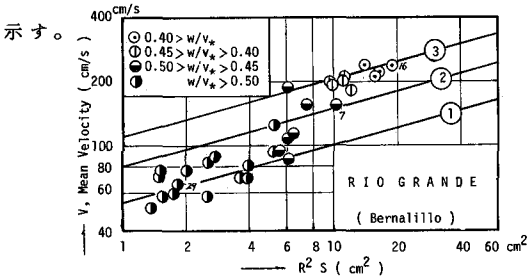


図-7 リオ・グランデにおける $V - R^2S$ 図

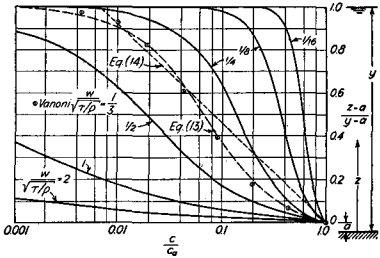


図-8 浮遊砂の鉛直濃度分布 (ラウス)

さて資料中でもつとも掃流力の小さい資料底 29 に対する移動可能最大粒径 d_m は $d_m = 3.82 \text{ mm}$ であるから、この資料の範囲内ではつねに $d_m > 0.30 \text{ mm}$ となり、河床全体はほぼ完全に移動していると推定される。(表-3)。したがつて小流量の場合には第 / 群の抵抗を示すことになる。さて掃流力が過大になると河床砂の一部が浮遊しはじめ、河床付近の土砂濃度を高め、カルマン常数の減少を招き結局河床抵抗を減じ、第 / 群から第3群への徐々に移行が行なわれるであろう。

H. Rouse⁽⁷⁾ は浮遊砂濃度の鉛直分布を研究し、砂粒の沈降速度 w と流れの掃流力 (摩擦速度 v_*) の比の大小により、図-8に示すような分布形状を得た。この方法にならつて、試みに w/v_* の値を計算したのが表-3である。

NO	R (m)	S $\times 10^4$	R^2S (cm^2)	V (m/s)	n $\times 10^2$	gRS (cm/s^2)	v_* (cm/s)	$\frac{w}{v_*}$	d_m (mm)	Q (m^3/s)
29	0.439	7.2	1.830	0.661	2.34	30.97	5.565	0.755	3.82	40.48
7	1.036	9.5	10.2	1.551	2.04	96.45	8.744	0.480	12.0	136.7
16	1.414	9.5	19.0	2.350	1.65	131.6	11.47	0.366	16.2	285.9

($d_m = 0.30 \text{ mm}$, S.F. = 0.7, Fall Diameter = 0.30 mm, $t = 20^\circ \text{C}$ $w = 4.2 \text{ cm/s}$)

表-3 リオ・グランデにおける移行の解析

さらに w/v_* の大きさに応じて4種の範囲に分類して図-7の $V - R^2S$ 図に記入した。この際、浮遊にともなう河床抵抗の減少に大きく影響するのは平均粒径 d_m でなく、むしろこれより小さい粒径の砂であると思われるが、粒度曲線が入手できないので単に d_m を用いて w を計算した。

なお、砂粒の Shape Factor = 0.7、水温 = 20°C と仮定して $w = 4.2 \text{ cm/s}$ を得た。

さて図-7によれば、 $w/v_* < 0.45$ のものは大体 Upper Regimeに属し、 $w/v_* > 0.5$ のものは第 / 群

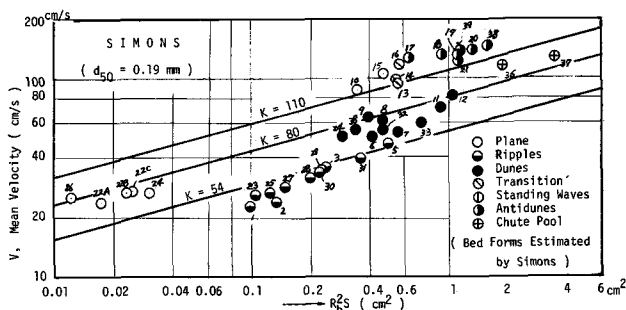
の Ripple の河床にちかいと考えることができ、浮遊する割合が大になるにつれて河床抵抗は徐々に減少し、Upper Regime に近づく傾向が認められる。

(8)
一方 D.B.Simons らは大型実験水路を用いて詳細な移動床実験を行なったが、彼らはこう配 S を $(0.55 \sim 95) \times 10^{-4}$ の範囲内で徐々に増加させることにより、Ripple 河床から Chute Pool を含みきわめて広範囲な河床面形態を発生させることに成功した。それらの資料のうちで $d_{50} = 0.19 \text{ mm}$ に対する $V - R_b^2 S$ 関係図は図-9 に示されている。なお各河床面形態の表示は、Simons らが自身で判定したものである。また彼等が定めた河床面形態ごとに w/v_* の大きさの範囲を求めて示したのが表-4 である。

Bed Form	Ripples	Dunes	Transition Plane	Antidunes	Chute & Pool
$\frac{w}{v_*}$	1.10 - 0.60	0.554 - 0.383	0.484 - 0.426	0.393 - 0.237	0.207 - 0.173

表-4 河床面形態と w/v_* との関係 (Simons, $d_{50} = 0.19 \text{ mm}$)

図-9 サイモンズの資料に
もとづく $V - R_b^2 S$ 図



他の粒径に対する実験資料については目下検討中であるが、上記の Rio Grande, Simons の例を参照すると、大体 $w/v_* > 0.5 \sim 0.6$ ならば Ripple 河床が維持されるが、それ以下では第3群にむかつて移行するようである。また図-8と比較すれば鉛直方向の濃度分布の傾向も大略推定できる。

謝 辞： この研究を行なうに当たり、九州地方建設局スタッフにより苦心して観測された貴重な河川資料を利用させていただいたことを心から感謝する。

参 考 文 献

1969.

- (1) 杉尾捨三郎：河川の平均流速公式と河床面形態との関係について；土木学会論文報告集、第177号、1969.
- (2) Jones, B.E.: Flow in Tennessee Checked against Hydraulic Formulas; Engineering News Record, Vol. 89, No. 15, Oct. 12, 1922, pp. 610-612.
- (3) 杉尾・築田：沖積実験水路の抵抗法則について；第15回水理講演会、I-9、1971、pp. 49-54.
- (4) 九州地方建設局編：粗度係数実測資料集、1955.
- (5) Sugio, S.: On the Mean Velocity Formulas of Rivers; Bulletin of Faculty of Eng., Tokushima Univ., Vol. 7, No. 2, 1970, pp. 55-74.
- (6) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究；土木学会論文集、第41号、1956.
- (7) Rouse, H.: Engineering Hydraulics; John Wiley & Sons, Inc., 1949, p. 801.
- (8) Simons, D.B. & Richardson, E.V.: Resistance to Flow in Alluvial Channels; U.S. Geological Survey, 442-J, 1966.