

河川の平均流速公式について

徳島大学工学部 杉尾 捨三郎

1. 概 説

河川の平均流速公式の研究の歴史はきわめて古く、Chézy, Kutter, Manning らの式はいまなお愛用されている。ことに Manning 公式は、固定壁をもつ水路に対してはよく適合するが、自然河川などの移動床壁に対しては不明確な点が多い。戦後移動床粗度に関する理論的研究が開発され、多大の発展をなしとげたが、河川に対しても Einstein を始めとし、椿、細井、芦田、山岡らにより流体力学的な検討がなされてきた。しかし上述の理論的方法を現実の河川に適用するには、未だ若干の不安が存在することも確かで、粗度係数 n を適確に定める方法が現在みつからない状態にある。例えば、洪水理論、感潮河川論、不等流の背水計算、平衡河床理論など、理論解析の方法は近年いちどしく進歩しているにもかかわらず、その理論中に使用されるべき n の性格の検討は遅れたまゝになっていることは残念である。

一方、流体力学的な検討をやめ、専ら実用本位な平均流速公式を求めようとする試みが、約 80 年前から一部の河川技術者らによつて長年続けられてきた。インド地方の河川の研究から始められた「レジム法」は、流砂を伴う河川が長年月にわたつて洗堀も堆積もおこさぬ、いわゆる Stable な状態になったとき、流量、河巾、水深、コウ配、河床材料特性、浮遊砂量などの諸量相互間に存在する法則を実験河川の多くの測定資料から推定しようとするもので、Kennedy, Linsley, Lacey, Lane, Blench らがその代表的な研究者である。いま径深を R 、コウ配を S 、流れの平均流速 V_m を

$$V_m = K R^a S^b \dots\dots\dots (1)$$

で示すことにすれば、Manning 式では $K = 1/n$, $a = 2/3$, $b = 1/2$ である b は 0.5 とする経験式もきわめて多いが、Lacey⁽¹⁾ が 1930 年に発表したものは (2) 式である。

$$V_m = 16.0 R^{2/3} S^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

(ft - sec unit)

彼は 1946 年には $a = 0.5 (1 + n')$, $b = n'$ を提案し、最近では 1966 年に、 $a = 5/8$, $b = 1/4$ と改訂し、砂床に対しては $K = 14.22$ を、石れき床に対しては $K = 9.5$ を与えている⁽²⁾。
永井⁽³⁾ は遼河などの満洲河川を対象として次式を発表した。

$$V_m = \frac{1}{n_k} R^{0.55} S^{0.20} \dots\dots\dots (3)$$

(m - sec unit)

ここに n_k は砂れき係数とよばれ、河床砂れきの粒度から推定せねばならぬ。Simons⁽⁴⁾ は Lacey の (2) 式にならい、 V_m と $R^2 S$ との関係を 4 種の河川について検討した結果 河床および河岸の土砂特性の組み合わせにより、図一に示すように 3 種の実験式を得た。

coarse non-cohesive : $V_m = 17.9 (R^2 S)^{0.286} \dots\dots\dots (4)$

Sand beds and cohesive banks: $V_m = 16.0 (R^2 S)^{1/3} \dots\dots\dots (5)$

Sand beds and banks: $V_m = 13.86 (R^2 S)^{1/3} \dots\dots\dots (6)$

(ft -sec unit)

このうちの (5) 式は Lacey の (2) 式と同一である。

元来河川の平均流速は R や S 以外に多くの複雑な要素に支配される上に、エネルギーコウ配の代りに水面コウ配を使わざるを得なかつたり、浮子を使用する簡易な流速測定が行なわれることもあり、測定資料そのものにも若干の誤差が加わるものと思われる。従来のレジム法による研究では、個々の河川資料に忠実になり過ぎたため、一般性をもつ法則が得られにくかつたのであろう。

そこで本研究では平均流速公式を巨視的に眺めることにより、多くの河川に共通な傾向を発見することに重点をおいた。まず Lacey の (2) 式にならつて、 $(R^2 S)$ を含む平均流速公式を考えて多数の自然河川に適用した結果、典型的と思われる 3 種類の群を抜き出し、さらにこれらの群と河床面状態との関係を検討するために、新たに $S \sim q / wd_m$ 図を利用することを提案した。

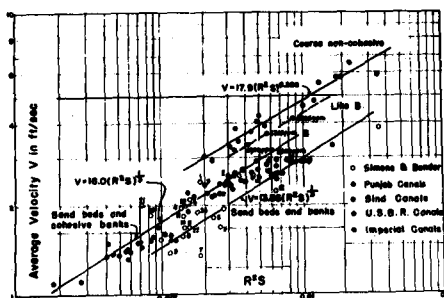


Fig. 1 Variation of mean velocity with $R^2 S$ for regime channels. (Lacey type slope relation.)

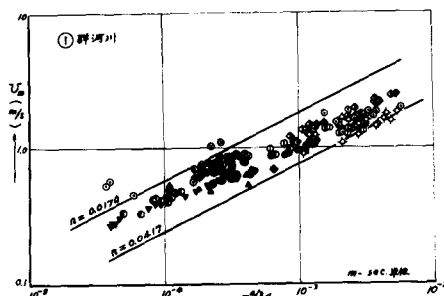


図-2. 河川の平均流速と $R^2 S$ との関係

2 平均流速公式の提案

従来 Manning 公式の適合度を、わが国の若干の河川（後述の ① 群の河川）について検討したのが図-2である。図上の水平軸と $1/2$ のコウ配をなす直線が Manning 式を示し、かつこの資料の変動巾は $1/n$ に相当するから、こゝでは $n = 0.0179 \sim 0.0417$ となつた。

さていま Lacey や Simons にならつて、 V_m と $R^2 S$ を両軸においた両対数紙の上に、わが国およびインドの河川の資料を点描したのが図-3である。描点はかなり数に達するが、概略的に云えば 2 種類に分類できる。まず ① 群に属する描点は図-2に用いた資料と同一のものから得られており、変動巾は Manning 公式の場合の $1/2$ 以下である。式で示せば

① 群: $V_m = 54 (R^2 S)^{0.27} \dots\dots\dots (7)$

② 群: $V_m = 80 (R^2 S)^{0.27} \dots\dots\dots (8)$
(cm - sec unit)

① 群の諸河川のコウ配は 1.5×10^{-3} 程度以下のゆるやかな流れで、河床砂は $d_m = 2.0 \text{ mm}$ 以下の細粒が多かつた。特に澳洲の 4 河川の描点はよく (7) 式を満足している。白川^(5,6)の資料は、流量が $50 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以下の低水時に ① 群の上側のり、粒径のやや大きい北上川、川内川の描点は、洪水時に

はやはり①群に属するようである。注意すべきことは、河川によつては①群から②群へ、または②群から①群へ「移行」することがありうる。例えば犀川の描点は前者で、琢磨川は後者の例である。これに反して河床材料の特に大きい常願寺川の描点は、大洪水になつても移行しない。

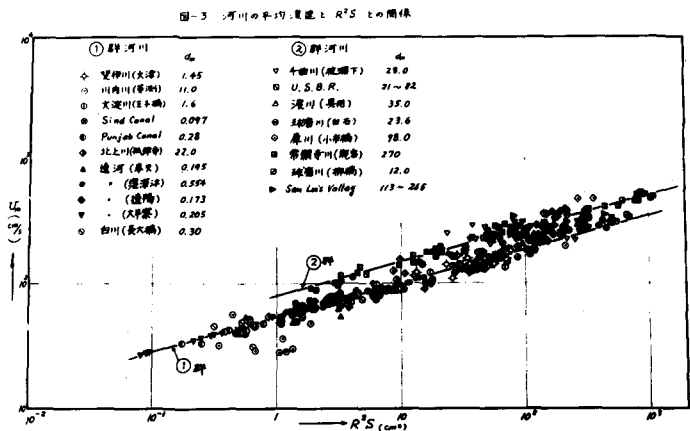
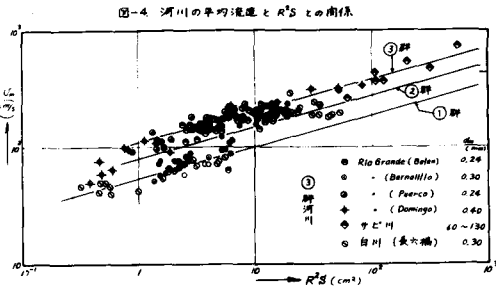


図-4には特に流体抵抗の小さい③群、すなわち Upper regime に属する河川例を集めてみた。この群は、水面コウ配がきわめて急であるか、またはコウ配はそれほど急でなくても河床砂がきわめて小さく、かつ流量が大きい場合におこるものと考えられる。

図-4にあげた描点数も少なく、かつ描点の散開もいちどるしいが、傾向としてはほぼ(9)式のまわりに集まると考えてよい。



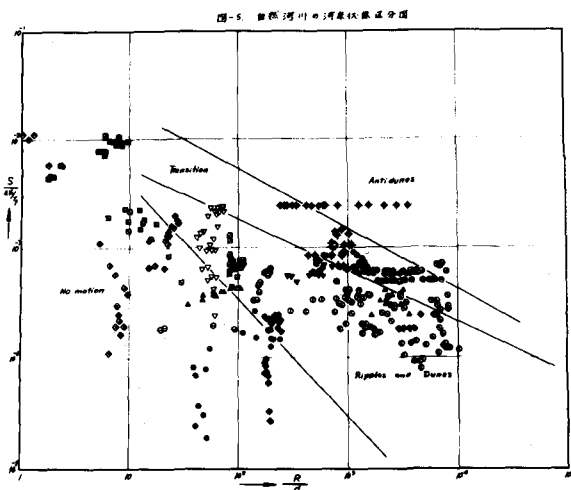
③群:
$$v_m = 110 (R^2S)^{0.27} \dots\dots\dots (9)$$

ここでも流量の増減によつて移行現象がみられる。例えば白川の例では $Q < 50 \text{ m}^3/\text{sec}$ の描点は①群のまわりにあるが、 $Q > 200 \text{ m}^3/\text{sec}$ の描点は③群に移行している。さらに流量が増加すると描点はヤミ下り、流水抵抗を減ずるが、これは Antidunes を生ずるためと推定される。サビ河⁽⁷⁾は木下が調査した代表的砂れき堆河川で、河床材料は大砂利程度、コウ配は 1/100以上の急コウ配であるから、わが国の砂防施工河川によくみられる河状であると解せられる。描点数が少ないので断言はできないが、白川の例とは異なり下降部分をもっていない。

最後に、砂れきが限界掃流以下の状態(いわゆる固定床)の場合についても一応検討したが、低水時における測定資料の取扱い上若干問題点もあり、かつ描点が適度に散開する傾向があるので、ここでは十分な結論を与えるに至らなかった。

3. 河床面の状態と平均流速公式との関係

上述したように自然河川の平均流速公式には 3 種の代表的な型があることが明らかになったが、それらの各群は河床面の状態と密接な関係があると予想される。そこで Garde⁽⁸⁾ の方法に従って自然河川の資料を点描したのが図-5 である。著者らはさきに、Gilbert や Simons が実施した多くの室内実験資料を Garde の図上に点描して詳細に検討した結果、彼の図に示された各 Regime の境界線のうち限界掃流力状態を示す線と、Antidunes 以上を示す線は合理的であるが、Transition と Dunes and Ripples との間の境界線の設定は不合理であることを明らかにした。さて図-5 をみると、さきの ①群に含まれた資料の大部分は Garde 図の Dunes and Ripples の領域内に含まれるのは合理的であるが、斐伊川や遼河(ワフーム)の揚点の大部分が Transition の領域内にはいるのは適当でない。また Rio Grande 河の Domingo 地点の資料は、流速公式の立場からみると ①, ②, ③ 各群の範囲にまだがつているはずであるのに、図-5 においては Dunes に属する揚点を見出すことができないのも、この方法の都合のわるい点である。



著者らは最近 $S \sim q/wd$ とを両対数紙の両軸にとる区分法を提案し⁽⁹⁾ Gilbert や Simons らの実験結果もかなりよく適合することを述べたが、この法を自然河川の資料について検討したのが図-6 である。こゝに S はコウ配、 q は単位巾当りの流量、 d_m は河床の平均粒径または d_{65} 、 w は粒径 d_m の砂粒のもつ静水中の沈降速度である。 w の計算は、米国土砂委員会の手いめる方法⁽¹⁰⁾ によつて行ない、水温は 20.3°C 、砂れきの比重を 2.65、砂粒の形状係数 (shape factor) を 0.7 とみなして求めた。砂れきの沈降粒径が 10 mm より大きいときには、球体の Drag Coefficient の C_D と wd/v の関係図を用いて試算を行なつた。

さて図-6 において、Transition 領域をはさむ上下の 2 種の実線は、さきに実験資料に対して定められたものと同一である。限界掃流力状態に相当する境界線上では仮りに Manning - Strickler の式、 $n = 0.016 d^{1/6}$ が成立するものと考えれば (11) 式が得られるから、従つて図-6 上ではその境界線は Slope が $-\frac{7}{6}$ をもつ直線で表わされることになる。この際、粒径の d_m によつて

(11) 式の係数 C_k の値が若干変化するるので、岩堀公式⁽¹¹⁾ を用いて U_{*c}^2 を計算すれば、 $d_m > 3 \text{ mm}$ の範囲では概々 $C_k = 0.068$ とみてよい。図-6の境界線はこの値を用いて描かれている。

$$\left. \begin{aligned} q / wd &= C_k S^{-7/6} \\ C_k &= 197.6 \left[U_{*c}^2 / g \right]^{5/3} / w d_m^{7/6} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

Dunes の領域の上下にある領域は、各描点が所属する各群ごとに大体の区分線を図上に挿入したもので、実験から得た区分線とはやゝ異なるが、河川資料がさらに豊富に入手できれば修正するべきである。

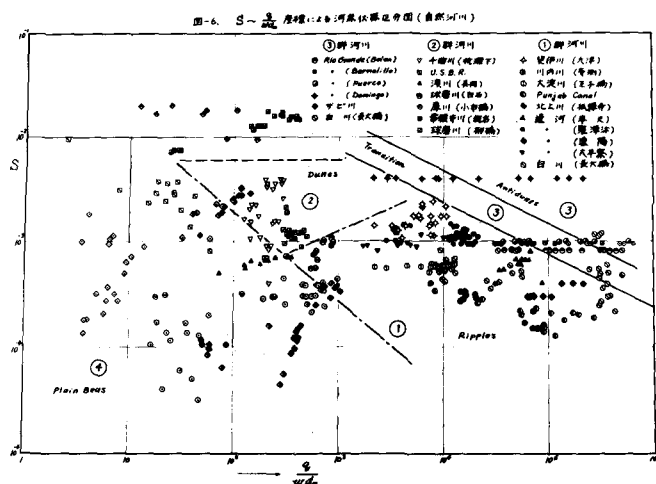


図-6を検討することにより、さきの①群は実験における Ripples をもつ河床に相当し、②群は Dunes に対応する。また③群は Transition と Antidunes とに対応することが想像される。まず斐伊川と遼河(ワフーム)の描点は完全に①群の領域内にあり、かつ Domingo 地点の描点も②群から③群の Upper Regime にまで達し、図-3、図-4と矛盾しない。Rio Grande 河の他の3河川の描点も①群から③群にまで拡がり、Garde の区分法を用いるより好結果を与える。一般にコウ配が約0.001 よりも緩やかで、かつ q / wd_m が大きいと Ripples が生じ易いが、その場合の流体抵抗は Dunes の場合よりも大きいことは注意すべきことである。また図-3、図-4における、ある群から他の群への移行は、図-6上の各境界線を横断するときにおこる現象であろうと考えられるのである。

4 結 言

- (1) 自然河川の平均流速公式を巨視的にみると、(12)式に要約され、係数 K の値には大略 3 種の型が存在する。ただし、①群では $K = 54$, ②群では $K = 80$, ③群では 110 である。

$$V_m = K R^{0.54} S^{0.27} \dots\dots\dots (12)$$

(cm - sec unit)

- (2) 図-3, 図-4にみられるように、ある群から他の群へ「移行」することがある。
- (3) 与えられた河川がどの群に属するかを推定するために、図-6に示す $S-q/wd_m$ 区分図を利用することを提案する。
- (4) 図-6により、①群の河床状態は Ripples, ②群のそれは Dunes, ③群のそれは Upper Regime であることが推定される。
- (5) Simons が提案した (4) 式は 2 群の (8) 式とほぼ同一で、彼の (5), (6) 式は ①群の (7) 式にちかい値をもつ。

河川の平均流速公式は径深 R , コウ配 S を最も重要な要素としているが、その他河床砂れきの特性および河川断面内の配置状態、水路断面形状、護岸の有無、植生状態、浮遊土砂の影響などに左右されるはずで、(12)式の K の値は実は一定とは考えられないが、本論文では多くの河川に共通をきわめて概略的傾向をつかむ意味であえて一定とみなしたに過ぎず、今後の研究にまらたい。

資料の多くは建設省、各地方建設局が長年苦心して調査し整理されたもので、貴重な資料の利用をお許しいたいた関係各位の御厚意に感謝する。計算その他には徳島大学大学院生、堀勝也氏をわずらわした。この研究は文部省科学研究費、および災害科学特定研究費をうけて実施されたことを付記し、関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) G.Lacey : Stable Channels in Alluvium ; Proc. Inst. Civ. Engrs., Vol. 229, (1929-1930), p. 259.
- (2) G.Lacey : Discussion for " Stable Channels with Gravel-paved Beds " by R.Kellerhals ; Proc. ASCE, Vol. 93, Nov. 1967, pp. 248-250.
- (3) 永井莊七郎 : 移動床を有する小水路および自然河川における新流速公式 ; 土木学会誌、第 28 巻 第 4 号
- (4) D.B.Simons and M.L.Albertson : Uniform Water Conveyance Channels in Alluvial Material ; Proc. ASCE, HY 5, May 1960, pp. 33-71.
- (5) 九州地方建設局編 : 粗度係数実測資料集 ; / 933.
- (6) 建設省河川局計画課編 : 粗度係数の資料 ; / 933. 1965, p. 316.
- (7) 井口昌平 : 砂れき堆の形成に関する水理学的考察 ; 東大生産技術研究所報告, 第 14 巻, 第 5 号、
- (8) R.J.Garde and K.G.Ranga : Regime Criteria for Alluvial Streams ; Proc. ASCE, Vol. 89, No.HY6, Nov. 1963, pp. 113-164.
- (9) 杉尾繪三郎 : 沖積河川の河床状態の区分法 ; 土木学会中四国支部学術講演会要集, I-12, July 1968.
- (10) Task Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division : Sediment Transportation Mechanics; Introduction & Properties of Sediment ; Proc. ASCE, Vol. 88, No.HY4, July 1962, pp. 77-107.
- (11) 岩堀雄一 : 限界渦流力の流体力学的研究 ; 土木学会論文集, 第 41 号, 1956, pp. 1-21.

(Oct. 1968)