

移動床をもつ流れの水路床状態の区分について¹⁾

正員 杉尾 捨三郎*

ON THE CRITERIA FOR THE BED FORMS IN ALLUVIAL CHANNELS

By Sutesaburo Sugio, C.E. Member

Synopsis: This paper describes a method to estimate the criteria for various bed configurations in alluvial channels. Under the investigations by means of the dimensional analysis, criteria are proposed on a logarithmic diagram plotting the relationship between the bed slope S and the entrainment function ψ . It seems that this method is applicable to the data not only in experimental flumes, but also in natural streams.

要旨 本論文は移動床水路における種々な水路床状態を分類する一方法を述べたものである。次元解析法を用い縦軸には勾配 S を、横軸には掃流関数 ψ をとった両対数図によってあらわす区分図を提案した。この方法は実験水路における資料に適するだけでなく、自然河川にも適用できるようと思われる。

1. 概 説

砂が水によって集団的に運搬されるときの水路床状態の様式には、dune, smooth bed, antidune の 3 形式があることは古くから知られている。Gilbert, G.K. はさらに dune と smooth bed, smooth bed と antidune との間にそれぞれ transition の状態があることを詳細な実験によって示している。砂を一様に平らに敷き均した水路において、掃流力を次第に増すとやがて砂は移動しはじめ、砂面上に微弱な凹凸ができる、表-1 (a) のような形の砂漣ができる、ゆっくり下流に移動する。dune が発達しつくすとこんどは形が崩れ、ついには dune は消えて表面は比較的平らになり、砂粒はめまぐるしく移動する。これが smooth bed の状態である。第 3 番目の

ween the bed slope S and the entrainment function ψ . It seems that this method is applicable to the data not only in experimental flumes, but also in natural streams.

antidune では砂面も水面も大きい波の形となる。砂面の縦断形は dune に似ているが、頂部が円くむしろ前後対称的で、かつ頂部は時間の経過とともに上流にむかって進む点が dune と異なる（表-1 (c)）。このときの砂粒は転動だけでなく、跳躍、浮遊をまじえた激しい複雑な運動をする。regime のよび方は研究者によって若干異なるので、これをまとめたのが表-1 である。最近の傾向としては、砂漣が小型で形の規則正しいものを ripple、大型で形の不規則なものを dune とよんでいるようである。

さてこのような regime の変化は、砂が移動するときの物理的機構を変えるだけではなく、粗度を大きく変化させる。はじめ plane bed であった場合に ripple ができると急に抵抗がまし、さらに dune に移ると一段と抵抗があります。さらに掃流力が増大すると transition または smooth の状態になり抵抗は急に減少し、始めの状態よりも粗度が小になることがある。antidune になると粗度はほぼ一定になるようである。このように regime と粗度との間には複雑な関係が存在するため、従来移動床

表-1 水路床状態の名称

Investigator Bed Condition	Gilbert	Liu	Brooks Vanoni	I.W.E.S.	W.E.S.	Kramer	Albertson
(a)	dunes	plane bed ripples dunes bars	smooth	ripples transition dunes	local riffles general riffles sand waves	smooth bed weak riffles medium riffles excessive riffles	plane bed ripples
(b)	transition	smooth bed	flat smooth bed	flat bed	sheet movement		dunes
(c)	transition	(transition)	antidunes	antidunes			transition antidunes

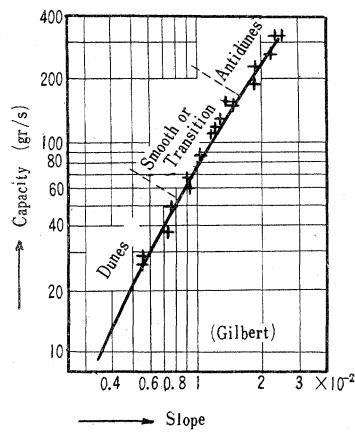
* 德島大学教授、工学部土木工学教室

の抵抗法則の研究の発達が阻害されていたのであり、自然河川の流速公式に対する十分な精度が得られなかつたのであろう。したがって、どのような条件のときにいかなる bed の状態になるかを明らかにする必要がある。本文ではまず regime の決定法に関する従来の諸研究を簡単に紹介し、つぎに次元解析によって得られた著者の方法を述べる。これは $\log_{10} S$ と $\log_{10} \psi$ を両軸にして整理する方法で (S : 勾配, ψ : 掃流関数), 取扱いが簡単で実験室内の広範囲の実験値に適合するだけでなく、自然河川に対しても利用できるように思われる。

2. 従来の諸研究および考察

Gilbert²⁾ は彼自身の実験値をもとにし、縦軸に流砂量 (Capacity), 横軸に水路勾配をとることによって、regime がはっきりと区別できることを C 種砂について示した(図-1)。これは C 種砂の全資料についてあてはまるのでないから普遍性ある方法ということはできないがこの方面的研究に先鞭をつけた点で大いに注目される。

図-1 流砂量と勾配と水路床状態との関係



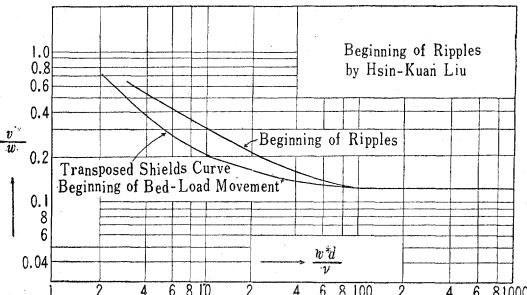
Langbein³⁾ はやはり Gilbert の実験結果を用いて regime の区分を試みた。彼は縦軸に勾配 S , または Froude 数 F_R (水深の代りに径深 R を用いた) をとり、横軸には平均流速と径深との積 vR をとった図を用いた。横軸はほぼ流量 q にひとしいから、 S を一定にしたままで q を増すと、はじめ dune であったものが smooth になり、さらに antidune にもなりうることがよくわかる。しかし資料の範囲が限られていることが惜しまれる。

Liu⁴⁾ は砂渦が発生するための条件として、流れが土砂を輸送しうること、および流れと移動床との間の境界面が不安定となることが必要だと述べ、これらの条件に対して 2 個の無次元量 v^*/w と v^*d/ν とが重要な役割を演ずることを示した。

$$\frac{v^*}{w} = \phi \left(\frac{v^* d}{\nu} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 w は土砂の静水中の沈降速度、 v^* は摩擦速度、 d は砂粒径、 ν は水の動粘性係数である。彼は v^*/w と v^*d/ν を両対数紙の両軸にとり、砂渦が発生する場合の実験値を点描することによって砂渦発生限界曲線を得たが、これは図-2 のような滑らかな曲線で示される。さきに Shields は掃流関数 ψ と v^*d/ν を両対数紙の両軸にとることによって限界掃流力に相当する曲線を得たが、Liu の表示法をつかうと一層なめらかな曲線が得られる点も注目される。

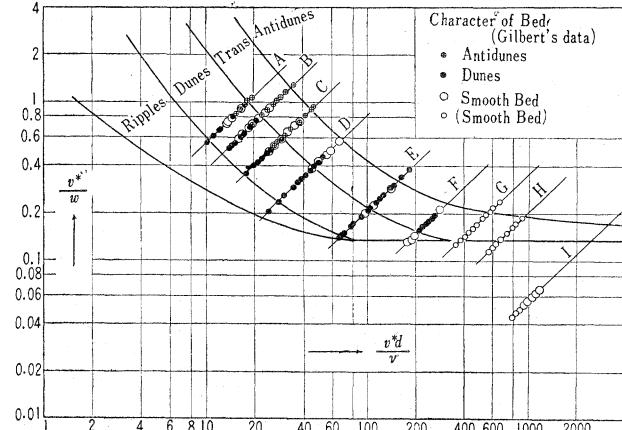
図-2 砂渦の発生開始曲線



さらに Albertson⁵⁾ らは Liu の説を発展させて、乱流理論における層流底層の厚さ δ' を考え、 d/δ' と上記の v^*/w との関連性を明らかにし、さらに種々の実験値を引用して水路床状態の regime を
ripples, dunes, transition, antidunes,
の 4 種に区分し、それぞれの regime の形成限界を定めた。この図を用いると、粒径が一定である限り、描点は粒径ごとに 45° の傾斜をなす直線上に配列するから、流量や勾配の変化によって水路床状態が変化する経過がきわめてよく表示されることになる。なお最近 Liu は、上の図によるよりも v^*/w と v^*d/ν を両軸にとった表示法がよりよい結果を与えると述べている⁶⁾。

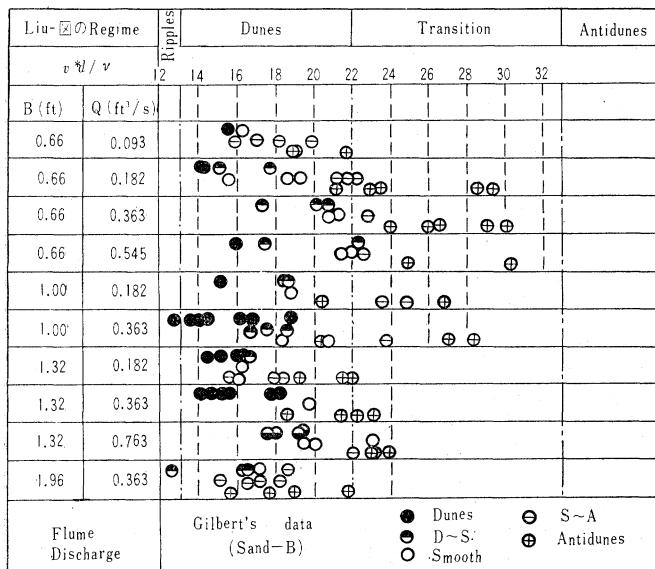
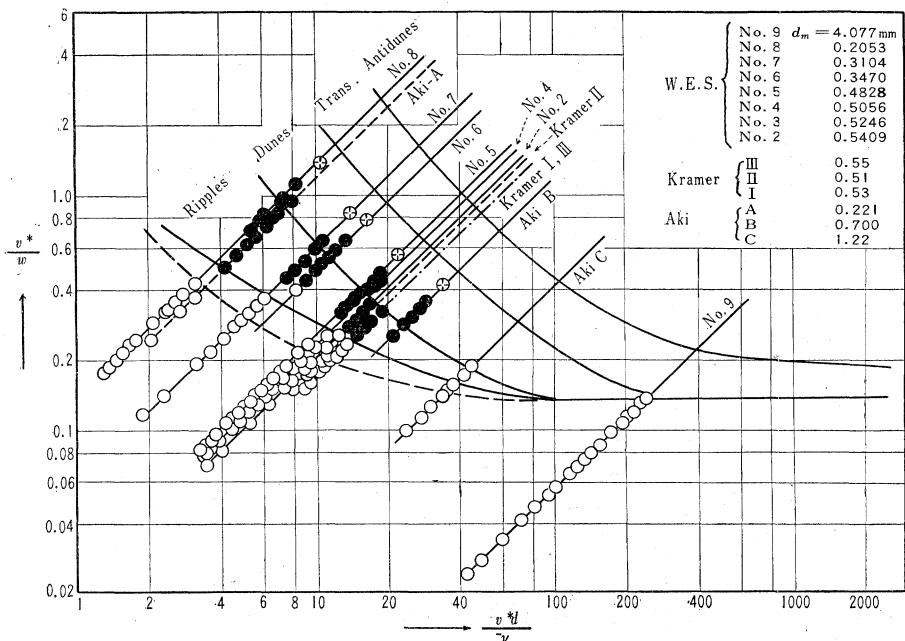
そこで著者は Liu, Albertson の提案した方法が Gilbert, Kramer, W.E.S., 安芸博士などの実験値および自然河川の資料に対し、どの程度の適合性をもつかを

図-3 $v^*/w \sim v^*d/\nu$ 図によって分類された Gilbert の資料

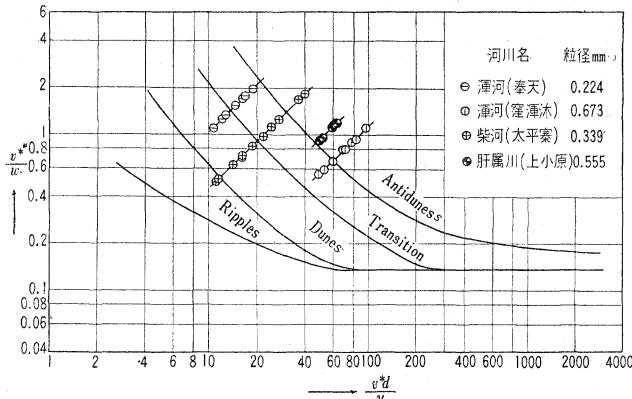


再検討してみよう。図-3 は著者が計算した Gilbert の資料の描点を示している。このさい、水路壁の影響を取り除くために Einstein の方法を採用した⁷⁾。さて Gilbert の原文において dune と記録されたものは Liu の図において dune の regime 内にうまく収容されているが、ただ E 種砂は transition の regime にまで伸びている。Gilbert の原文において smooth と書かれた描点は Liu 図上では dune の中央から transition の中央あたりまでの範囲に拡がっている。F 種砂より大きい砂についてはかなり合理的であるが、粒径の小さい A,B,C 種砂で

原文に antidune と記録されたものは、smooth と記録されたものと、Liu の図において共存する場合がかなり見られ、ことに dune とも重なる場合があるのは不自然である。図-4 は一例として B 種砂について水路床状態と v^*d/v との関係を描いたものである。B 種砂に対する regime の境界における v^*d/v の値はそれぞれ 13, 23, 33 であるから、これを同図に示してある。この図をみると v^*d/v だけで regime を決定することは、少なくとも B 種砂については困難である。つぎに Kramer, W.E.S., 安芸博士らの実験値を Liu の図で整理すると

図-4 v^*d/v によって分類された Gilbert の資料 (B 種砂)図-5 $v^*/w \sim v^*d/v$ 図により分類された実験水路に対する水路床状態

Liu の図の上で
は描点の一部が
ripple の regime
にまで侵入して
いる点が若干異
なる。W.E.S.⁹⁾
の実験では、原
文に general ri-
fle と記録され
た描点は、Liu
の図上では ri-
pple および
dune の中央付
近までの区間に
配列する。また
粒径の最も大き
い砂種 No. 9
($d_m = 4.077$ mm)
ではつねに

図-6 $v^*/w \sim v^*d/\nu$ により分類された自然河川の資料

smooth であったと記録されているのに対し, Liu の図により描点は明らかに限界掃流力以下の領域に集まるところからうまく説明できる。

つぎに Liu の図が自然河川に対して適用できるかどうかについて検討してみよう。永井博士の研究¹⁰⁾にのせられた満洲河川、および肝属川の資料を Liu の図上に点描したもののが図-6である。描点は dune, transition, antidune の各領域にまたがっているが、上にあげた諸河川は水面勾配が 1/1 000 以下で、砂粒径も 0.22~0.67 mm の範囲にあることを考えると、このような河川の河床状態が、transition はとも角として、antidune になるとは考えられない。また満洲諸河川の資料について、(8) 式から k_s/d を計算してみると 100~400 程度であることから、このときの河床状態は ripple または dune であろうと推定するのが至当と思われる。資料の数が少ないのであるが、上述の理由から Liu の図は自然河川に対してはあまり適しないようである。なお以上の計算においては、鶴見博士の提案された公式を用いて土砂の沈降速度 w を計算したことを付言しておく。

3. 著者の方法

移動床をもつ流れの水路床状態は、粗度と密接な関連をもつことは 2. において説明した。そこで移動床の粗度を規定する合理的な関係式を次元解析によって求めてみよう。

移動床をもち、かつ 2 次元的とみなされる矩形断面水路内の粗度に関する諸変数が次式

$$F_1(h, S, v, \rho, \mu, r, d, \sigma, \sigma_1, S.F.) = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

で結合されているものとする。ここに、 h は水深、 S は勾配、 v は平均流速、 ρ は水の密度、 μ は水の粘性係数、 r は水の単位重量、 σ は砂粒の密度、 σ_1 は砂粒の混合状態、を示すもので、例えば標準偏差、 $S.F.$ は砂粒の形状に関する変数で、例えば c/\sqrt{ab} で示される shape factor とよばれる無次元量である¹¹⁾。なお、 a, b および c は、砂粒子の表面に交わってできる直交三軸の長さのう

ち、それぞれ最長、中間および最短のものである。さて (2) 式における r の代りに h, S, ρ や σ や r によって組み立てられる量 $(ghS)^{1/2} = v^*$ を用い、かつ $S.F.$ の代りに砂粒の静水中の沈降速度 w を用いれば次式が得られる。

$$F_2(h, S, v, \rho, \mu, v^*, d, \sigma, \sigma_1, w) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 v, ρ や d を反復変数にえらべば、7 個のパイ項が得られる。

$$\phi_1\left(\frac{h}{d}, S, \frac{vd}{\nu}, \frac{v}{v^*}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{\sigma_1}{d}, \frac{v}{w}\right) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

σ/ρ の代りに $(\sigma/\rho - 1)$ とし、さらにこれを $v^{*2}/(\sigma/\rho - 1)gd = \psi$ でおき替え、若干の変形を行なうと次式が得られる。

$$\frac{v}{v^*} = \phi_2\left(\frac{h}{d}, S, \frac{vh}{\nu}, \psi, \frac{v^*}{w}, \frac{\sigma_1}{d}\right) \dots \dots \dots (5)$$

さらに 3 次元的な扱いをし、一部を変形すると、

$$\frac{v}{v_R^*} = \phi_3\left(\frac{R}{d}, S, \frac{v_R^* d}{\nu}, \frac{v_R^{*2}}{(\sigma/\rho - 1)gd}, \frac{v_R^*}{w}, \frac{\sigma_1}{d}\right) \dots \dots \dots (6)$$

となる。さらに $F_R = \sqrt{S} \cdot v/v_R^*$ なる関係によって、 S の代りに Froude 数 F_R を用いれば次式が得られる。

$$\frac{v}{v_R^*} = \phi_4\left(\frac{R}{d}, F_R, \frac{v_R^* d}{\nu}, \psi, \frac{v_R^*}{w}, \frac{\sigma_1}{d}\right) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $v_R^* = (gRS)^{1/2}$ で、 R は径深である。さて、これらの式の左辺の無次元量を φ であらわせば $\varphi = v/v_R^*$ であり、 φ と摩擦係数 f 、Manning の粗度係数 n 、Chézy 係数 C 、相当粗度 k_s などとの関係は、

$$\left. \begin{aligned} f &= 8/\varphi^2 \\ C &= \varphi \sqrt{g} \\ n &= R^{1/6}/\varphi \sqrt{g} \\ \varphi &= 6.25 + 5.75 \log_{10} R/k_s \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

で示すことができる。

(8) 式で明らかなように、 φ は直接粗度に関係する量であるから、粗度と密接な関係のある水路床状態の regime もまた (6) 式または (7) 式で規定されることが予想される。まず Shields の提案した限界掃流力の表示法は (7) 式の右辺のパイ項のうち、 $v_R^* d/\nu$ と ψ を最も重要な項としてとり出したものであり、Liu の表示法は $v^* d/\nu$ と v_R^*/w 、または wd/ν と v_R^*/w をえらんだものである。Langbein の方法は (5) 式にもとづいて、右辺の項より勾配 S と vR/ν を最も重要な無次元量とみなしたものと了解することができる。

前述のように Liu または Albertson による方法はかなりすぐれた方法ではあるが、transition から antidune あたりになると Froude 数の影響がかなりはいってくると思われ、この点において不備があると考えられている。事実、Kramer, Straub, 岩垣博士¹²⁾、篠原博士¹³⁾、著者¹⁵⁾

らも Froude 数の影響について示唆しており、Gilbert の資料について著者がしらべたところでは、明らかに F_R の影響を無視できなかった。図-7 は Gilbert の A~F 種について、 F_R を縦軸に ψ を横軸にとって水路床状態の分類を行なったものである。これによれば regime ごとの描点はある領域を占有し、それらの境界は式では表現しにくいが、前述の Langbein が定めたものよりはるかに多くの実験値をふくんでいる。

さて (6) 式において最も重要な無次元量として勾配 S と掃流関数 ψ をえらべば、

が得られる。 ψ の値が小さいときの描点が密集することを避ける目的で縦軸には $\log_{10} S$ を、横軸には $\log_{10} \psi$ をとって Gilbert の資料を点描すると図-8 が得られ

図-7 $F_R \sim \psi$ 図による水路床状態の分類

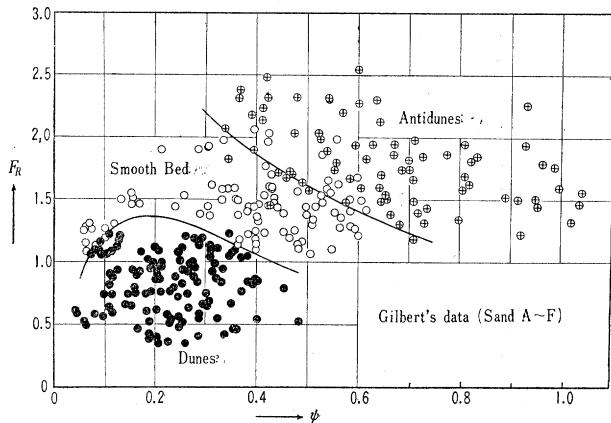
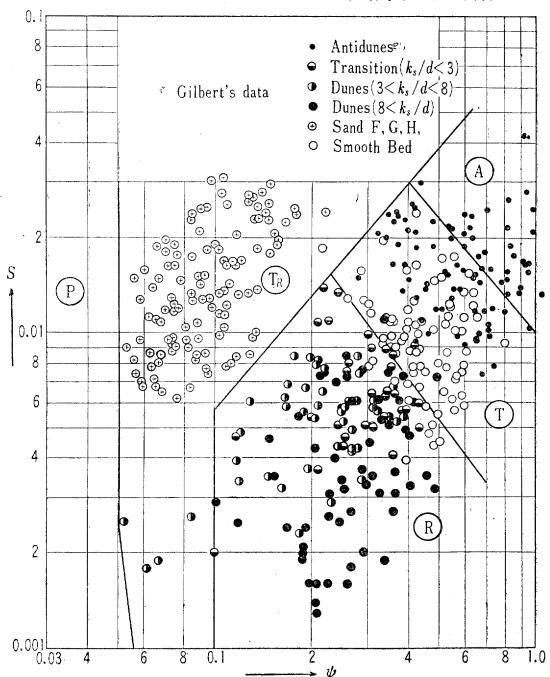


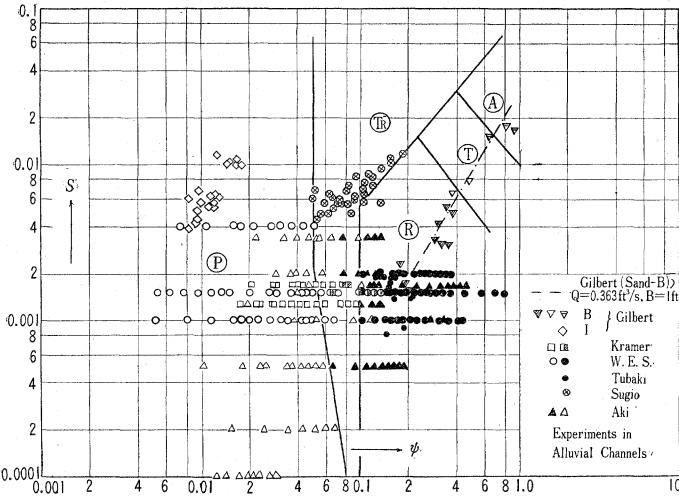
図-8 $\log_{10} S \sim \log_{10} \psi$ による水路床状態の分類



る。この方法によれば *antidune* と *smooth* の領域で若干境界の不明瞭な部分がある以外は、*regime* ごとに大体明瞭な領域が存在することがわかる。まず原文に *dune* とかかれた描点はすべて $\psi \geq 0.05$ の範囲に分布する。ここで特に問題となるのは、*dune* に属する描点と、図-8 中において (T_R) と記号した部分の描点に関するものである。まず、*dune* の描点については、Gilbert の資料のうちの $k_s/d > 8$ のものと、 $8 > k_s/d > 3$ のものとに区別してみると、前者は図の下方に、後者は比較的上方に位置することがわかる。これは、勾配 *S* の小さいものほど砂渦を生じ易いことを示している。また粒径の大きい F,G,H 種砂に対する描点はほとんど図中の (T_R) の領域に収容される。これらについて k_s/d を計算してみると、そのほとんどが 1~3 程度の値をもち、

Gilbert の原文には smooth とか transition とか、あるいは水路床状態の記載が次れているものがふくまれているが、 k_s/d が極端に小さいから、結果的には smooth の場合よりやや大きい程度の抵抗を与えるのであろう。しかし Gilbert の示すように dune から antidune までの間の smooth の示す領域とはやや性格が異なると思われる所以、やはり一種の transition の意味の記号 (T_R) をつけて区別しておいた。なお Gilbert の原文において、antidune と書かれた描点と smooth と書かれた描点が共通に占める領域が広いので、これと smooth の領域とを合わせて Transition とみなし、(T) と記号をつけることにした。図中の太い実線は著者が区分した区分線である。

つぎに Gilbert 以外の人によって行なわれた移動床に関する実験値を $S \sim \psi$ 図に点描すると図-9 が得られる。Kramer の実験値は、原文で excessive ripples と記録されているものでも ψ の値はかなり小さく、従って砂渦の規模もかなり小さいことが想像される。W.E.S. の実験値では粒径の小さい No. 7 種砂 ($d_m=0.310$ mm), No. 8 種砂 ($d_m=0.205$ mm) などが (R) の領域の中央まで伸びている。原文において general ripples と記録されたものは k_{sl}/d が数十以上で、完全な砂渦とみなすことができる。粒径の最も大きい No. 9 種砂 ($d_m=4.077$ mm) では、一例として $S=0.0040$ の場合の描点を図示しているが、水路床状態は明らかに Plane Bed である。図には示されていないが $S=0.0030$ の場合も同様で、ただ $S=0.0045$ のとき若干 (T_R) の領域に侵入する描点があった。安芸博士らの実験値¹²⁾の A, B 種砂の場合は $S=1/300$ から $1/10\,000$ までの範囲のもので、図には一部分の資料しかせてない

図-9 実験水路資料に対する $\log_{10} S \sim \log_{10} \psi$ 図

が、Plane Bed から Ripple まで変化する。 $S=1/5000$ と $1/10000$ の描点は A 種砂に対するもので、これらは砂が移動しない (P) の領域内にある。C 種砂では、 $S<1/800$ のものはほとんど砂の移動せぬ領域内にあり、また $1/300$ と $1/600$ のものでも (T_R) 領域を越えるものはほとんどないことは、原文の実験記録と一致する。また人工水路の砂漣に関する椿博士らの研究の実験値⁶¹⁾も明らかに Ripple の regime に収容されている。

さて著者がせきによる堆砂現象に関する研究¹⁷⁾において実施した実験 K,L,M,N などについての描点は、図中の (T_R) 領域内に集中した。その大部分は、水面の波立ちも少なく測定も容易であった。粒径は $d_m=0.756 \sim 0.89$ mm の準均一砂であったから、Gilbert の実験における F,G 種などと大体同一の領域内に集まつたのであろう。なお著者の実験では Gilbert の場合と同様、実験中絶えず上流から給砂していたために、水路床状態が比較的 smooth になったものと思われる。このことについては Schoklitsch も若干触れており、上流から十分に砂が補給されると水路床はなめらかになると述べている。著者の実験においても、実験中に一時的に砂の補給が止まると砂漣が発生するのが認められた。

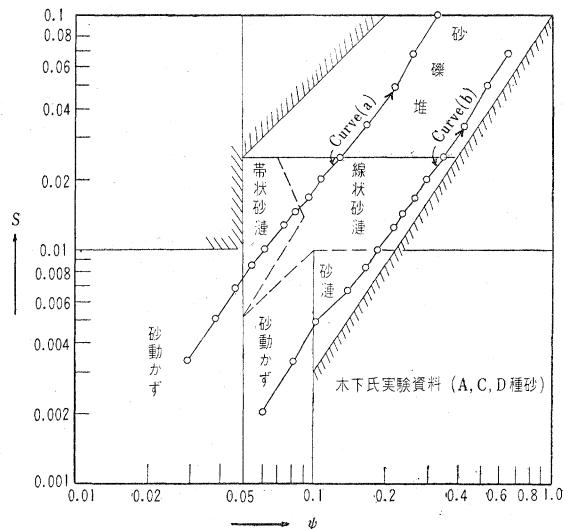
Kramer, W.E.S., 安芸博士らの実験では、 S を一定にしておき流量 Q のみを変化してゆくから、描点は図の左から右にむかって水平に移動し、その間の水路床状態の変化は図-9 から推定することができる。従って著者の実験でも、もし勾配を一定のまま Q を順次増加したとすれば（実際は設備の関係で不可能であったが）、おそらく小規模の ripple が発生したであろうと想像される。

これに対し Gilbert の実験では、 Q を一定にしたままで順次 S を増して測定されているので、上述の諸実験と趣を異にする。一例として図中には、B 種砂で $Q=0.$

$363 \text{ ft}^3/\text{s}$, $B=1.00 \text{ ft}$ の場合の描点が鎖線とともに regime 別に記入してある。これによれば、はじめ dune (ripple) であったものが smooth に変わり、ついには antidune となる経過がわかる。 Q が大きいときはこの鎖線は右方へ、粒径が大きくなると左方へ移動する傾向がある。つぎに木下良作氏が行なった『砂礫堆に関する実験』¹⁸⁾に記載された A,C および D 種砂について、 $S \sim \psi$ 図をつくると 図-10 が得られ、砂礫堆は大体 $S \geq 0.025$ の領域内に分布する。線状砂漣と帶状砂漣は $S < 0.025$ の領域内にあり、かつ前者は ψ が大きいときに、後者は ψ が 0.05 と 0.09 の間に分布した。これらの描点は 図-8 と比較すると、大体

(T_R) 領域内にあり、かつ Gilbert の実験における F, G, H 種砂の描点の領域に相当し、砂礫堆はこれより上方の領域にあることがわかる。木下氏の実験も Gilbert の実験と同様に、 Q を一定に保ちながら順次 S を増加して実施されたので、描点は 図-10 の曲線 (a), (b) に示すように、 S が増すにつれて ψ も増加してゆく。例えば (a) についてみれば、矢印に沿うてまずはじめは砂が動かない状態から帶状砂漣に、さらに線状砂漣へと変わり、最後に砂礫堆へと変化することがわかる。また曲線 (b) では砂の動かない状態から普通の砂漣に、それから線状砂漣をへて砂礫堆に変化する。流量 Q が大きいほど、また粒径が小さいほど曲線は右に移動することは Gilbert の場合と同様である。

このようにして Gilbert その他数多くの実験値を参考として、図-9 のような水路床状態の区分図が得られたわけであるが、これによると一般に $\psi < 0.05$ の範囲の

図-10 砂礫堆に対する $\log_{10} S \sim \log_{10} \psi$ 図

ものは plane bed で、 S の小さいものほど ripple になりやすい。plane bed と rippli の領域の間に transition の領域があり（図の T_R に相当）、 S が小さいほど巾が狭くなる。 S も ψ も大きいものは transition (図中の T)、さらに ψ が大きいと antidune になるが、これらは粒径の小さいものが多い。木下氏の実験を考慮に入れるならば、さらに $S > 0.03$ の領域は砂礫堆が占めることになる。実験流量の点からみると、木下氏の実験における q_{max} は $7.575 \sim 83.33 \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$ であるが、Gilbert の実験では $q_{max} = 256.2 \sim 1577 \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$ である。そこで、木下氏が認めた線状砂渦や帶状砂渦は流量がきわめて小で水路勾配の大なるときに現われ、 q が極端に大になると Gilbert の F, G, H 種砂のような状態になるものと推察される。

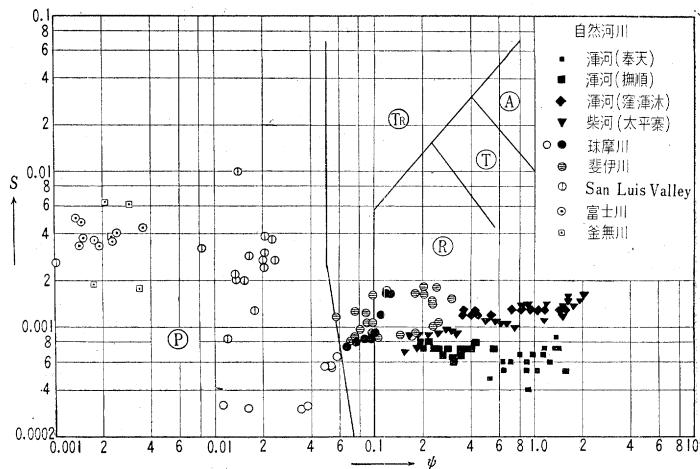
最後に自然河川における資料を若干集めて $S \sim \psi$ 図に記入したのが 図-11 である。各資料において k_s/d を計算し、その値が 10 以上のものを参考のため黒点で示したのであるが、大部分 rippli の領域に入るので、おそらく実際に rippli が発生しているとみなしてよいと想像される。斐伊川における実測¹⁹⁾では砂渦ができると記録されているが、やはり rippli の領域内に存在する。ここにあげた河川の勾配 S は $4 \times 10^{-4} \sim 20 \times 10^{-4}$ 程度で、平均 $1/1000$ 程度のものが多いが、これらの描点は実験から描かれた $\log_{10} S \sim \log_{10} \psi$ 図の分布図のなかの rippli の領域内にうまく収容されている。球磨川の描点は plane bed と rippli の両方にまたがっている。San Luis Valley の描点は plane bed 領域内に存在するから、細粗粒が混合している関係で、比較的細粒のものは部分的に移動することはあるが、河床全体が同時に移動することはほとんどないものと推察される。

4. 結 言

Liu と Albertson が提案した水路床状態の区分法は取扱いがきわめて簡単で、流量や勾配変化にもとづく水路床状態の変化を要領よく説明でき、ことに掃流力の小さいものに対しては多くの実験値にうまく適合する点で大いに注目すべき研究である。しかし Froude 数が大きい場合や自然河川に対してはあまり適当でない。

著者の提案した方法は、 $\log_{10} S \sim \log_{10} \psi$ 図を用いて多くの実験値から regime ごとの区分図を描いたもので、これによると Froude 数の相当大きい実験値もうまく包含され、かつ自然河川に対する資料もかなりうまく収容できる。従って、この方法を利用することによって移動床上の実験資料の分類が可能になるから、従来かな

図-11 自然河川に対する $\log_{10} S \sim \log_{10} \psi$ 図



り困難視されてきた移動床の抵抗法則の研究にも役立つのではないかと思われる。この研究を行なうに当って、京都大学 石原藤次郎博士、岩垣雄一博士の御指導と御示唆をいただいたことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 杉尾捨三郎：水路床状態の様式について、第 15 回土木学会年次学術講演会講演概要、第Ⅲ部-22、1960, pp. 45-46.
- 2) Gilbert, G.K.: Transportation of Debris by Running Water, U.S. Geological Survey, Prof. Paper, No. 86, 1914, pp. 1-259.
- 3) Langbein, W.B.: Hydraulic Criteria for Sand-waves, Trans. AGU, 1942, pp. 615-618.
- 4) Liu, H.K.: Mechanics of Sediment-ripple Formation, Proc. ASCE, Vol. 83, No. HY 2, 1957, pp. 1-23.
- 5) Albertson, M.L. and Others: Discussion of "Mechanics of Sediment-ripple Formation" by Liu, Proc. ASCE, Vol. 84, HY 1, Paper 1558 1958, pp. 1-23.
- 6) Liu, H.K. and Hwang, S.Y.: Discharge Formula for Straight Alluvial Channels, Proc. ASCE, Vol. 85, No. HY 11, 1959, pp. 65-97.
- 7) Einstein, H.A.: Formulas for the Transportation of Bed Load, Proc. ASCE, 1941.
- 8) Kramer, H.: Sand Mixtures and Sand Movement in Fluvial Models, Trans. ASCE, Vol. 61, pp. 798-878.
- 9) W.E.S.: Studies of River Bed Materials and Their Movement with Special Reference to the Lower Mississippi River, U.S. Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, Paper 17, Jan. 1935.
- 10) 永井莊七郎：移動床を有する小水路及び自然河川における新流量公式（後編）、土木学会誌、第 28 卷、第 7 号、1942, pp. 632-660.
- 11) 岩垣雄一：米国における土砂水理学の現況、京都大学防災研究所報告、第 48 号、1939, pp. 23-64.
- 12) 安芸俊一・佐藤清一：砂粒河床模型実験の基本に関する実験ならびに限界掃流力に関する研究、土木研究所報告、第 48 号、1939, pp. 23-64.
- 13) 岩垣雄一：開水路水流の理論、土木学会水工学論文集、1953, p. 14.
- 14) 梶原蘿爾・樋東一郎：移動河床の粗度、土木学会第 2 回水理研究会講演会前刷、1957, pp. 5-7.
- 15) 杉尾捨三郎：実験水路における移動床の粗度について、土木学会第 2 回水理研究会講演会前刷、1957, pp. 3-4.
- 16) Tsubaki, T., Kawasumi, T. and Yasutomi, T.: On the Influences of Sand Ripples upon the Sediment Transport in Open Channels, Report of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. 2, No. 8, 1953, pp. 241-256.
- 17) 杉尾捨三郎：堰による堆砂現象に関する研究、1960, pp. 92-123.
- 18) 木下良作：砂礫堆に関する実験（第 3 報）、朽木川砂防委員会調査報告書、1956, pp. 1-123.
- 19) 斐伊川工事事務所：斐伊川における掃流砂についての実験結果および流砂量計算方法について、1956, pp. 1-42.

(原稿受付: 1960.7.25)