

河道のなかの流れの特性について(第1報)

東京大学生産技術研究所 井口 昌平
東京大学工学部 鮎川 登
東京大学生産技術研究所 吉野 文雄

まえがき

自然河川に生じている力学諸現象は、従来その現象に含まれる複雑性のために統一的に考察することが困難であると考えられてきたが、昨今、河床に形成される砂礫堆に注目した研究が進められるようになり、この現象の解明が自然河川の形態ばかりでなく、流れや土砂の流送の現象をより深く理解するためにも重要であつて、これによつて自然河川における力学的諸現象をこの面から統一的に考察できる可能性が生じてきた。

この砂礫堆がやゝ滞積傾向を示す直線河道で顕著に見られるということは、Rhein 河、Weichsel 河、Donau 河などの河床測量に基づいて19世紀半葉頃すでに Grebenau、Girardon、Jasmund、Faber 等によつて指摘されている。¹⁾さらに20世紀初めには Engels、Blasius 等が実験水路において砂礫堆を形成させている。²⁾

砂礫堆を形成する水流は一般に水路幅に比し水深が小さく、このため実験水路で砂礫堆を再現するには水路床勾配を大きくする必要があり、この特殊事情のためこれまでの可動河床水路での実験ではほとんどこの現象は看過されて来た。

1950年代に入り、日本では木下博士が数多くの河川でこの砂礫堆が形成されていることに着目し、この現象と河道蛇行とを結びつけて蛇行現象の解明を試みている。³⁾筆者等の研究室でも数年以前からこの現象の研究を行ない、この現象の水理学的考察や形成限界等について研究を進めて来た。^{4) 5)}

ここでは可動河床と流送土砂と川の流れの間の作用によつて流れの方向と斜めに交わる線をもつことで特徴づけられる洲が交互に左右岸に沿つて形成され、したがつてその河床の上の流れの様相も交互に曲がつた流動をし、またこの様な洲が徐々に下流に移動するという現象を呈する「砂礫堆」(図4参照)と呼ばれる河床形状の上の流れについて実験的事実を明らかにすることにする。

2 砂礫堆の形成に關与する水理諸量間の關係について。

砂礫堆を形成する水流に注目した時、これが三次元的流動をしているという難点に立ち到る。砂礫堆の発達している状態について注意すべきことは、流れの断面の形が Thalweg のうねりによつてわかるように、一方の岸の近くでは著しく深くその他の大部分のところでは浅いという形をなしていることが多いことである。そのような断面の区間では流れの状態を考慮する以上は、種々な水理量について断面全体についての平均量を取扱かうというこれまでの水理学的方法では、この現象を表現するためには不十分であると考えるのが自然であらう。しかし砂礫堆の形成に關与する水理諸量間の關係を巨視的に眺め、その平均量間の關係を論ずることが全く意味のないこととはいえない。ここでは流速、水深、こう配等の水理諸量を断面全体の平均量として用い、これら諸量が砂礫堆の形成という状態を総合的に表現するものと考え、次元解析の手法でこれら諸量を関連づけることにする。

移動床の粗度に関する研究は、a) 固定床開水路の対数則を拡張する方法、b) 粗度を粒子による摩擦抵抗と河床の形状抵抗の和として表現する方法、c) 次元解析による方法、等が従来行なわれて来ている。

対数則を基礎とする方法は、管流や固定床開水路の流れではその流速分布が対数法則にあてはまる場合が多く、流れは二次元流と考えられるので適用されうるが、砂礫堆を形成する水流は三次元流であつて厳密には適用できない。しかし固定床乱流と比較するために対数則に基づくパラメーター $1/\sqrt{f}$ 、 h_m/d_m を座標にえらび図示すると図1となる。ここで f は無次元摩擦係数、 h_m 、 d_m はそれぞれ平均水深および土砂の平均粒径である。この図で $k_s = d_m$ の直線は、 h_m を径深 R でおきかえれば、

$$\frac{u_m}{u_*} = 6.25 + 5.75 \log \frac{R}{k_s} \quad (1)$$

となり、開路固定床乱流を表わす Keulegan の式に相当するものである。この図から明かなように砂礫堆が形成されている時の水路床の抵抗は固定床開水路の抵抗と比べると相当大きい。これは固定床開水路では床面の粗さだけが粗度の要素であるが、砂礫堆を形成した移動床では砂粒の粗さのほかにさらに砂礫堆の形状による抵抗が加わるからであり、この形状抵抗が両者の差となつてあらわれていると考えられる。

砂礫堆の形成による抵抗の増加について一般的な結論は言い得ないが、一例として流量 52 L/s 河床砂の平均粒径 23 mm、こう配 1/50 で 45 回実測した結果を、砂礫堆形成前と形成後について表示すると次表となる。

これによるとこの条件のもとでは表面流速、平均流速とも砂礫堆の形成により形成前の流速の約 95 % になつている。

移動床水路ではその上を流れる水流は水理量の特徴だけでは表示されず、水路床構成砂の特性にも影響される。したがつてその流れは一般に次のような変数間の関数関係で表示される。

$$f(h, B, u, I, d, \delta, W, \rho_s, \rho_f, \mu, g) = 0 \quad (2)$$

ここで h は水深、 B は水路幅、 u は流速、 I はこう配、 d 、 δ 、 W 、 ρ_s はそれぞれ水路床構成物質の代表粒径、粒度分布の標準偏差、沈降速度、密度、 μ は流水の粘性係数、 g は重力の加速度、である。次元解析による平均流速の表示は従来多数の研究発表がなされて来ているが、著者は砂礫堆上の流れを総括的に表現する量として、平均流速 u_m 、平均水深 h_m 、平均粒径 d_m 、それに摩擦速度 u_* を用い

$$\frac{u_m}{u_*} \sqrt{\frac{h_m}{d_m}} = f\left(\frac{h_m}{d_m}\right) \quad (3)$$

てなる表示を考えた。これは図1の関係からも明らかに想定されるものである。この無次元量の物理

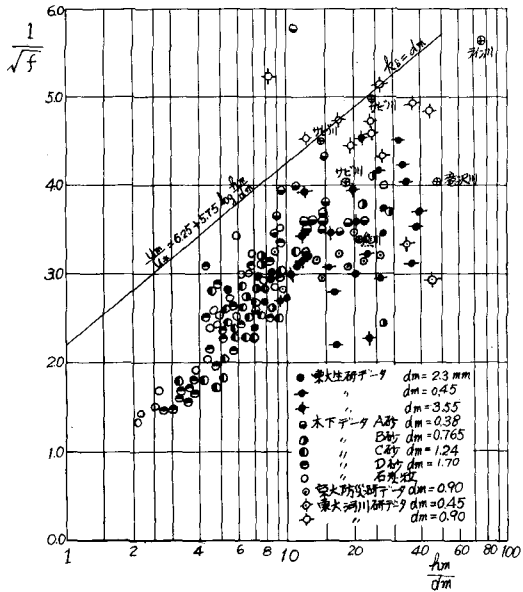


図1 抵抗係数 $1/\sqrt{f}$ と h_m/d_m の関係

	形成前(I)	形成後(II)	(II)/(I)
平均流速 u_m	53.8 cm/s	51.3 cm/s	0.954
表面流速 v_m	74.0	71.2	0.962

的意味を考えると、 $\frac{u_m}{u_*}$ 、 $\frac{h_m}{d_m}$ ともに流れが砂礫におよぼす力とそれに抵抗する砂礫の力の比を表わすものと考えられる。座標軸として $\frac{u_m}{u_*} \sqrt{\frac{h_m}{d_m}}$ と $\frac{h_m}{d_m}$ をとり実験結果を表示すると図2となる。この図の関係を式示すれば

$$\frac{u_m}{u_*} \sqrt{\frac{h_m}{d_m}} = 27 \frac{h_m}{d_m} \quad (4)$$

なる関係式が得られる。この式から Manning の粗度係数 n を求めると平均水深 h_m を径深 R に等しいと考えて

$$n = \frac{1}{27\sqrt{g}} \left(\frac{d_m}{h_m} \right)^{1/6} d_m^{1/6} \quad (5)$$

したがって

$$\frac{n}{d_m^{1/6}} = f\left(\frac{h_m}{d_m}\right) \quad (6)$$

の関数関係が考えられる。これを

Strickler の公式

$$n = 0.015 d_m \quad (d_m: \text{mm 単位}) \quad (7)$$

と比較図示すると図3となる。この図から $h_m/d_m > 20$ の範囲では $n/d_m^{1/6}$ は常数となる傾向があるが、実験水路でのような一般に h_m の小さな領域では h_m/d_m の関数であることがわかる。

また図2では河床砂として石炭粒（比重1.45）を用いた実験結果が砂粒（260）を用いたものと同時に示されているが、これら両者が比重の違いを考えなくても同一領域にあることが注目される。

3. 砂礫堆上の流れの流速分布状態について

(1) 実験装置。 砂礫堆上の流れの内部構造を微細に研究する目的で、長さ20 m 水路幅50 cm こう配 1/50 の直線水路に、平均粒径23 mm の砂を敷き均らし、490 l/s の流量の水を通水して砂礫堆を形成させた。この時に得られた河床形状を図4に示す。以後の解析で用いる座標系は、右岸に沿って流下方向に X 軸、これに垂直に水路幅方向に Y 軸、これらの X、Y 軸がつくる平面に垂直に Z 軸をとることにする。（論文の終りの実験方法補遺を参照）。

(2) 流速の分布状態について 砂礫堆上では流れは三次元的流動をしているので、その分布の状態を統一して示すことは困難である。流速測定の結果の一例を $X = 8.70 \text{ m}$ の断面について示すと図5～7となる。図5は河床の横断形状図と流速測定位置を示し、図6は Y 方向の流速成分 v の Z 分布図、図7は X 方向の流速成分 u の Z 分布図である。図7でわかるとおり砂礫堆上の流れの浅い部分では u はほぼ対数分布をしているが、深掘れ部ではかなり様相が異なる。図6をみると横断方向の流速 v は砂礫堆の前縁に沿う部分では正、負の両領域にまたがって明らかに底層における流れの方向と表層の

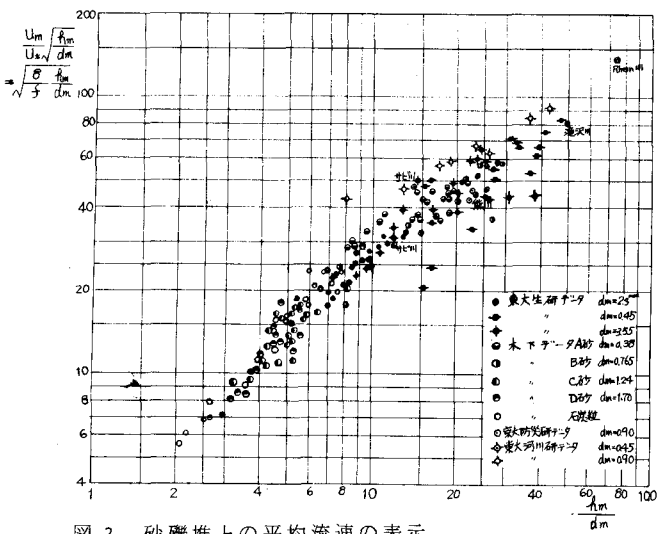


図2 砂礫堆上の平均流速の表示

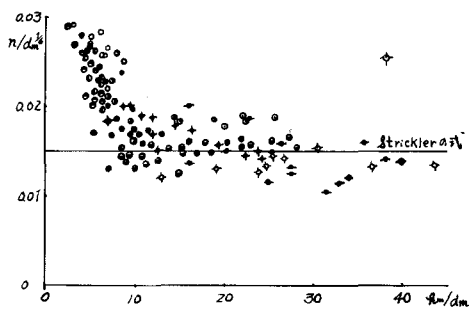


図3 粗度係数 n と h_m/d_m の関係

流れの方向がX軸に対して逆になつてゐることがわかる。この前縁から深掘れ部にかけてはX方向に軸を有する渦の発生が認められる。図6と図7を詳細に見比べると、二次流Vが方向をかえる点の両側では、主流の流速uが極小値を示している。二次流はこの領域ではほぼ $V=\alpha Z$ (α は定数)の分布を呈し、これは強制渦による流速分布形と同じである。

以上の様な深掘れ部の流れの状態に対して砂礫堆上の高い部分では二次流の分布状態は非常に単純であり、一般に放物線分布をしている。そしてこの $X=8.70m$ という断面では $Y=20cm$ 付近から左岸に向かうにつれて二次流の大きさは小さくなる。これはこの部分が左岸から中央部に向かって幅の広がる流れとなつてゐることを示しているものである。以上は $X=8.70m$ の断面における流れの状態を示したものであるが、砂礫堆上の流れの特徴を一般的に示していると考えてよいだろう。

(3)鉛直軸上の平均流速 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ の平面的分布状態について。ここで用いる鉛直軸上の平均流速は次式で求めるものとする。

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u dz, \quad \bar{v} = \frac{1}{h} \int_0^h v dz$$

この平均化された流速を、その地点を代表する量であると考え、これらがX-Y面内でどのような分布状態を示すかを実験値を用いて検討する。

砂礫堆という現象は、周期的現象であり、したが

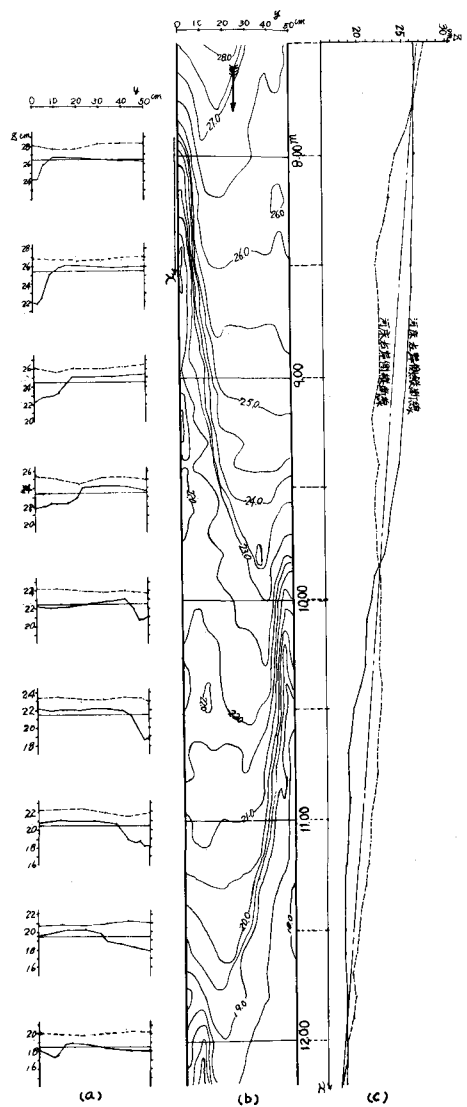


図4 河床形状図(a)横断面(b)平面図(c)縦断面

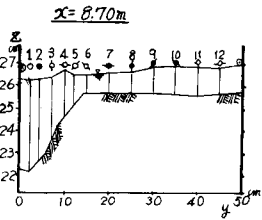


図5 流速を測定した断面図

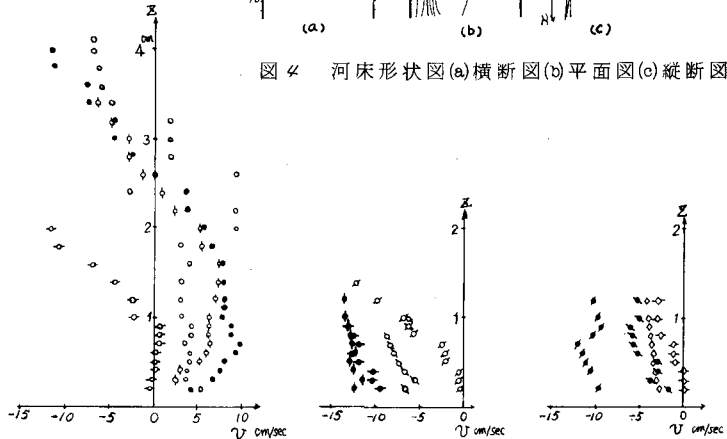


図6 Y方向の流速成分Vの2分布図

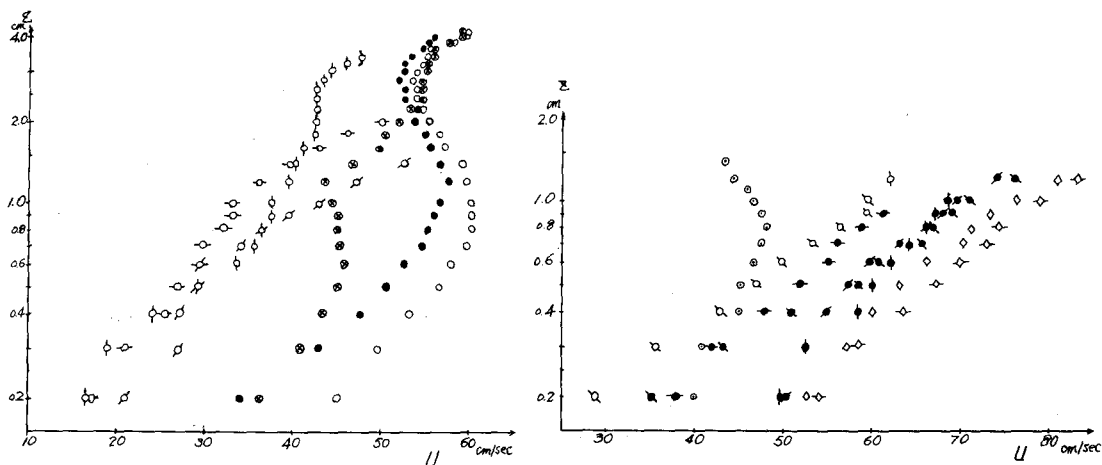


図7 X方向の流速成分 u の Z 分布図

つて理想的には流れの状態はある周期で再現されると考えられる。著者の行なつた実験ではこの周期性はほゞ $X = 190 \sim 200m$ で再現されていると考えられたので、これを実証する一例として、 $X = 800m$ $X = 990m$ の断面における平均流速 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ の再現性を調べた。それを示すと図8となる。 $X = 990m$ の断面の量は $X = 800m$ の断面の量とは付号が異なるので、図9でこの結果、流れの平均的状态がほゞ再現されていることがわかつた。[図9では $X = 990m$ の断面の量に統一して表示してある。

次に $\bar{v}$ が X および Y についてどのような分布を示すかをしらべたのが図9図10である。図9によると $\bar{v}$ は X についてほゞ正弦波的な変化を示すことがわかる。また図10によると、一般に砂礫堆上の幅の広がる領域では、 $\bar{v}$ はほゞ Y と共に直線的に変化している。

4 結 語

以上河道内に特有な流れである砂礫堆上の流れにつき、実験的事実を中心に述べて来たが要約すると次のようになる。

(1) 砂礫堆を形成する水流は断面平均の水理量を用いると $\frac{um}{u_*} \sqrt{\frac{hm}{dm}} = f\left(\frac{hm}{dm}\right)$ の関数表示ができる。

(2) 図2の関係から、河床砂の比重は、抵抗という点からは粒径ほど重要な要素ではない。

(3) Manningの粗度係数 n は、 $hm/dm < 20$ では hm/dm により影響される。

(4) 砂礫堆の前縁に沿う深掘れ部では、流れの方向に軸を有する大きな渦を形成している。この渦の中心部では主流方向の流速が遅らせられる現象が生じている。

(5) 深掘れ部から下流に向かつて流れは幅の広がる流れとなる。 $\bar{v}$ は河岸から中央部に向かつて直線的に増加する。

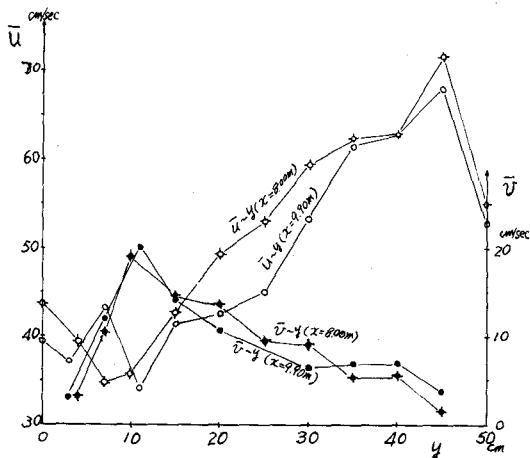


図8 $\bar{u} \sim Y$ 、 $\bar{v} \sim Y$ の X についての再現性

(6) $\bar{v}$ の x による変化は正弦波的であり、その周期は砂礫堆の長さに対応する。

実験結果に基づき砂礫堆上の流れの状態を総括して述べた。この種の研究はまだ緒についたばかりであり、今後さらに研究を続け、実験結果の一般化をはかるよう努力したい。最後に実験結果の整理を手伝ってくれた中野虎彦、森田正章両君に謝意を表する次第である。

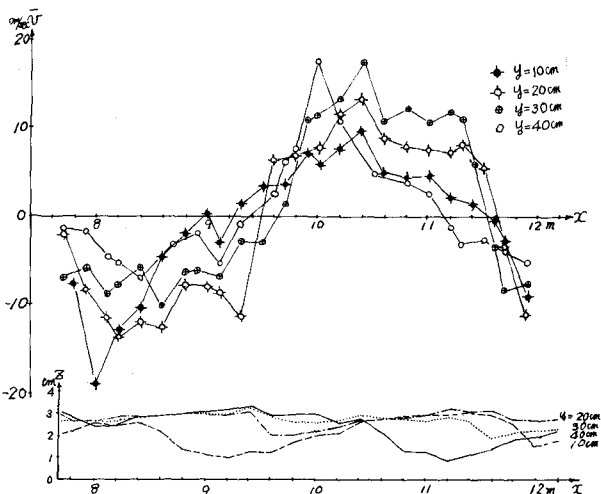


図9 鉛直線上の平均流速 $\bar{v}$ の x 分布図

参考文献

- 1) 井口、吉野、「河床形態の研究の過程について」、生産研究 VOI / 9、16 /。
- 2) 井口、「Donau 川の河床状態に関する Girardon 調査について」、生産研究 VOI / 9、16 /
- 3) 木下、「石狩川河道変遷調査」科学技術庁資源局資料。
- 4) 井口、「砂礫堆の形成に関する水理学的考察」生研報告、VOI / 5、165。
- 5) 井口、鮎川、「移動床形態の区分とくに砂礫堆の形成限界について」土木学会第11回水理講演会講演集。

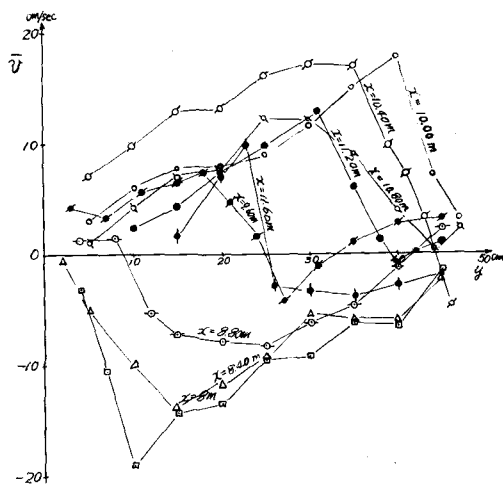


図10 鉛直線上の平均流速 $\bar{v}$ の y 分布図

註) 実験方法補遺

形成された砂礫堆を一斉断水した後、水性ビニール壁塗料ウォルトンを吹付けで固定し、再びもとの流量の水を通水した。そして x 方向には 10 cm 間隔、 y 方向には 2 ~ 5 cm 間隔、 z 方向には 1 ~ 2 mm 間隔でピトー管で流速の分布状態を測定した。砂礫堆上では流水の平均的方向が空間的に非常に異なるので、ピトー管の方向をほぼ流水の方向に向けて設置し測定を行な、である。