

礫床河川の粗度とゼロ面修正量

松岡 保正*

The velocity profiles over a gravel river bed.

Yasumasa MATSUOKA

The monin-Obukhov type velocity profiles over a gravel river bed are represented by the logarithmic law, i. e.,

$$\frac{\bar{U}(Z)}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{Z-Z_1}{Z_0},$$

where K , U_* , Z_0 , and Z_1 have their usual meanings respectively. Z_1 is called the zero displacement or displacement height (by analogy to the concept of the displacement thickness in boundary layer theory). Z_0 is called the roughness parameter, roughness length, or simply roughness.

When this formula is applied to the vertical velocity profiles in a river, a preliminary estimation of the value of those factors becomes necessary.

In this paper, they are estimated from the observation data, and the advantage of using this formula is also shown.

1. ま え が き

戦後の我が国に於ける水害の変遷をみると、1959年9月の伊勢湾台風に至るまでの15年間は、破堤を伴う壊滅的な災害が主体であった。その後は大型台風も以前程来襲せず、国力の回復と共に治水水準も徐々に向上した。1960年代後半よりの高度経済成長に伴う人口の都市集中と、その結果としての都市周辺での大規模且つ急激な開発は、水害の形を大きく変えた。その代表的なものは内水災害であるが、流出率の増大や流出の早期化に伴い、多くの河川で洪水流量の再検討が行なわれている。流域の土地利用環境に着目すると、以前は湿地或いは水田として利用していた所を、宅地或いは工業用地として利用する様になって来ており、安全且つ合理的、経済的な総合治水対策を講じるためには、流れを高精度で把握する必要がある。

河川における平均流速公式としては、Manning の式に代表される半実験的なものが、長い歴史を重ねているが、山地の中小河川等ではこれを凌駕する様なものは現在のところ無い。実験水路に於いては、我が国では足立¹⁾の表面粗度に関する一連の研究に代表される様に、数多くの研究者により様々の角度から検討されている。また、直接に流速分布を扱っている

* 土木工学科 助教授
原稿受付 昭和62年9月29日

わけでは無いが、宇民・上野²⁾らの可視化法による大スケール乱れの研究は、開水路流れの物理的イメージと乱れの理論を結びつける上での、大きな可能性を示している。

本文では、千曲川或いは犀川クラスの実河川に於ける鉛直方向流速分布について、近年の乱流研究の成果を活かしつつ、物理的イメージのより明瞭な理論式を適用し、粗度の特性量を評価する。また、現地河川に適用する際の問題点についても言及する。

2. 平均流速分布

平均流速分布としては、粗度要素の大きい場合の Monin-Obkhov 式を適用する³⁾。固定床水路の場合とは異なり、移動床それも実河川に於いては、高い精度で河床を特定するのは大変に難しい。平均河床をどうするかは別の機会に譲り、砂礫河床上の鉛直方向平均流速分布を模式的に図1に示す。Monin-Obkhov 式は

$$\frac{\bar{U}(Z)}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{Z-Z_0}{Z_0}, \dots\dots\dots(1)$$

で表わされる。Z₀は平均流速分布に対数則を適用した場合に平均流速が0になる様な水理学的な基準面、謂ゆるゼロ面からの高さで、粗度のパラメータ或いは単に粗度と呼ばれる。Z₁はゼロ面修正量を表わしている。Ū(Z)は河床からZの位置に於ける時間平均流速、U*は摩擦速度、Kはカルマン定数を表わしている。

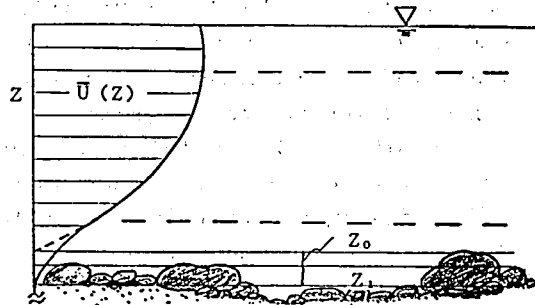


図1 砂礫河床上の流速分布

良く知られている Manning の式は(2)式で表わされる。更に、砂粒相当粗度を k_s として対数分布則を適用したものが(3)式である。

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\bar{U}(Z)}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{Z}{k_s} \dots\dots\dots(3)$$

(2)式に於いてUは断面平均流速、Iは水面勾配、Rは径深で川幅が水深Hと比較して十分大きい場合には、近似的に水深Hとする。(3)式に於いて摩擦速度 U* は、重力加速度 g として U* = √gRI で求める。

平均流速式としては上記のものについて検討するが、ここで、平均流速分布の形成について、模式図を混えてその概念を要約しておく。河川乱流場に於ける平均流速分布の形成プロセスの概略については奈越⁴⁾

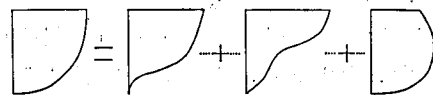


図2 平均流速分布形成過程

が易しく解説しているが、鉛直流速分布を示したものが図2、渦管の断面を示したものが図

3である。図2に於いて、河床近傍に生じた平均流の歪（ツアー）が増大するにつれ渦度も増加し、遂にはそれがカルマン渦として一定速度で放出され、歪が解消された状態を示しているのが=の右辺最初の図である。こうして、歪の大きい河床近傍では常に渦管が生成放出されている。放出された渦管は水面に向かって移動し、やがて消滅するというプロセスを繰り返す。渦管は上昇に際して湧昇流を発生させるため、渦管自体の断面積は小さくなくても平均流速を減少させる影響範囲は広がる。図3ではそれを太い白抜き矢印で表わした。こうした渦管の生成、放出、伸長（上昇）、消滅という一連のプロセスが幾つも繰り返され、それらの平均的な結果として対数分布が形成されると考えるわけである。実際には、それは3次元的に行なわれる為、もっと複雑な過程を伴っているが、その検討は別の機会に譲る。

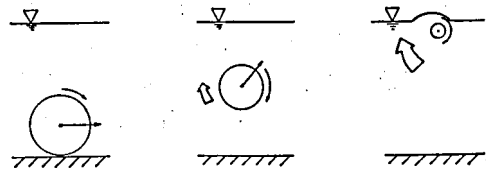


図3 河床からの渦の生成

3. 現地観測

現地観測は、長野市内の千曲川及び犀川に於いて行なった。観測地点を図4に示す。

A地点の水面幅は約90mで、上部より水面幅が狭くなっており、勾配も他の2地点より急で、流速が大きい。河床は20cm内外の礫及び砂が厚く、掘れ易い。水面では大小強弱無数のボイルが間断無く発生し、速い速度で流下している。

B地点の水面幅は約100mであり、水深は深い所でも1m以下の為、徒歩での渡河が可能な断面形状をしている。河床はA地点同様20cm内外の礫から成っているが、掘れ易くは無い。

C地点は3地点の中でも最も勾配が緩やかである。水面幅は約110mで、河床は10cm内外の礫から成っている。礫の表面はB地点同様に、かなり滑り易い。水面は静かで、ボイルは弱く小さい。水深はB地点同様に深い所でも1m内外で、徒歩での渡河が可能な断面形状をしている。

前述のように、平均流速の対数分布形成の主役が河床近傍で生成されるカルマン渦であるとすれば、対数則を適用する場合その事を考慮に入れる必要が有る。そこで、鉛直流速分布の測定

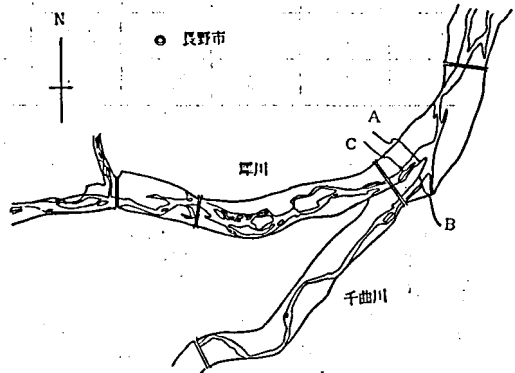


図4 観測地点

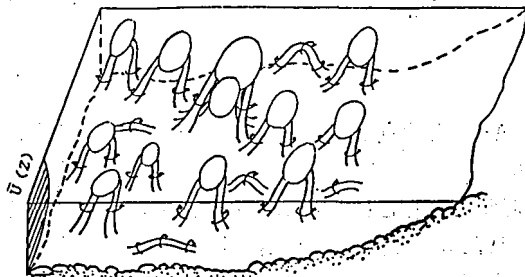


図5 水面のボイル列

は、そうしたカルマン渦が水面に達して生じさせるボイルの、普遍的に観察される所で行なう事にした。そのイメージを図5に示す。

流速変動の測定は、計測技研製の VM 201 とアレック電子製の ACM-200P 2 台を用いて行なった。河道内に設置する為、外径25mmの鋼管をボールクランプで固定した専用取付台を作成した。

観測時間については、最大乱子の発想からすると、それが10個程度通過する時間以上と言う事で、各水深15分から25分の間で行なった。電磁流速計からのアナログ出力は、ティアック製 R210B に収録した。

4. 解析結果

現地観測によって得られた3地点の平均流速分布のうちの代表的なものを図6に示す。(1)式の適用に当って、平滑化された流速分布を設定する際に、最大流速点の降下位置や個々の粗度要素の効果が一樣になる高さ等については、細かい検討を行っていない。これまでのスペクトル解析で $-5/3$ 乗則が普遍的に成立していると思われる範囲で設定した。

表1 3地点の粗度諸元

	H	Z ₁	Z ₀	U _*	U	I	\sqrt{gRI}	k _s	n
A1	93	5	0.1	9.2	115.6	1/700	11.4	1.9	0.031
B1	55	5	0.3	8.9	86.3	1/900	8.2	0.8	0.027
C1	72	5	0.5	7.6	61.0	1/1200	7.7	52	0.038

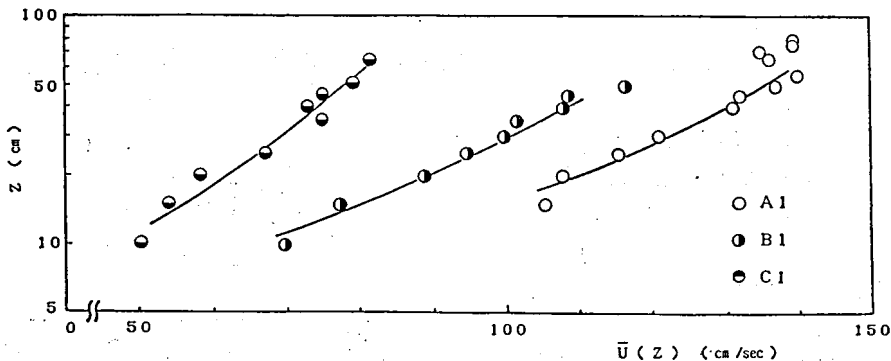


図6 3地点の平均流速分布

A₁ はA地点の岸から6mのもの、B₁ はB地点の岸から9mのもの、C₁ はC地点の岸から10mのものである。単位は、Manningの粗度係数nのみがMKSで算定されており、他はCGSで表わされている。表1中のU_{*}は、(1)式を適用して平滑化された流速分布から求められたものである。砂粒相当度k_sはU_{*}を \sqrt{gRI} で計算し、(3)式を適用して求めた。

水面勾配Iについては計画洪水時の勾配と相互の比較から定めているため、多少の誤差が含まれている。

表中の Z_1 について余り厳密な検討を加える意味は少ない。移動床、それも実河川に於いては河床を厳密に特定するのが難しい事と、 Z_1 が河床から流速分布の変曲点までの高さである事がその理由である。 U_* については同様の河床材料の場合（本文では礫床）、平均流速が大きいと U_* も大きくなる傾向が出ている。反面 Z_0 についてみると、その逆の傾向が伺える。ここで言う流速が大きい事が、勾配 I が大きいのか、流量 Q が大きいのかは、これだけの観測からは決められない。C地点の k_s が飛び抜けて大きな値となっている。確かに Z_0 も A_1 と C_1 では5倍となっており、緩勾配低流速の流れのほうが粗度が大きく効いてくる傾向は同じであるが、27倍強にもなっているのは基準面の位置が妥当でない為であると思われる。また、水面勾配 I を精度良く求める事はかなり難しく、(3)式の適用に当っては注意を要する。

実河川に於ける鉛直流速分布の測定を、本研究での様な方法で行なうとすると、設置可能な場所或いは水深が限られる。川岸から離れる距離に限度が有る為、観測位置選定には前述のボイルに注意しながら、できるだけ川岸の効果の小さな所まで出て行く事になる。計算に用いられる勾配 I や河

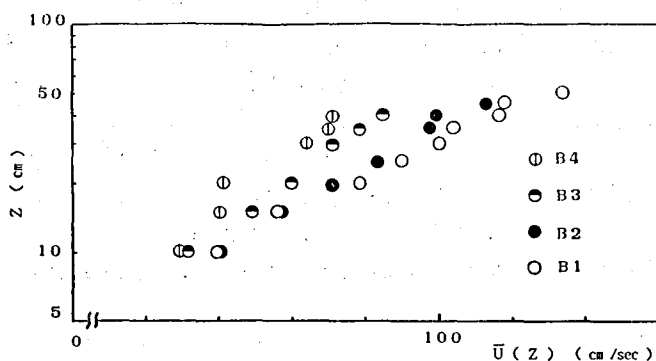


図7 B地点の鉛直流速分布

床材料の粒径は、川岸から離れても変わらないが、平均流速は確実に増加する。そうした川岸の効果（純粋にそれだけでは無いが）に着目した観測結果を図7に示す。

B₁, B₂, B₃, B₄ はそれぞれ岸から9m, 7m, 5m, 4m 地点の観測結果を表わしている。

水平方向の流速分布を考えた場合、川岸に近くなる程平均流速は小さくなり、摩擦速度 U_* も小さくなっていく。川岸の効果は想像以上で、この傾向が一定の所に収まるか、或いは更に線型的に続くのかの判断は下せなかった。これでは、B地点の粗度の平均値を評価する事は出来ず、今後の検討課題としたい。

Manning の n を表2でみると、粗石空積の石工水路の値に近い⁵⁾。全体としては粗度 Z_0 程大きくは変化していない。

砂粒相当粗度 k_s については、前述の様にかなり散らばってしまうので、B地点では評価しなかった。オーダー的には $k_s = (0.5 \sim 4.0)$ dm の間に有るとも言われている。

Z_0 については $30Z_0 = 9 \sim 3$ (cm) で、河床を構成している礫の高さのオーダーとなっており、その値は妥当なものが

表2 B地点の粗元諸元

	H	Z_1	Z_0	U_*	U	n
B 1	55	5	0.3	8.9	86.9	0.027
B 2	47	5	0.2	7.8	79.7	0.025
B 3	44	2	0.2	7.3	71.7	0.027
B 4	45	2	0.1	5.6	67.7	0.029

得られた。

結局、ゼロ面を精度良く決定出来るかどうかと、水面勾配を精度良く決定出来るかどうか
が重要な点となるが、前者については乱れの構造等とも関連付けて考える必要があろう。

5. あとがき

河床材料が砂礫である実河川に於いて鉛直流速分布を測定し、平均流速分布を決定づける
諸量の評価を行なった。その結果、ゼロ面修正量 Z_1 については代表的粒径の半分以下、粗
度 Z_0 については $30Z_0$ が代表的粒径のオーダーの値が得られた。 U_* については \sqrt{gRI} とし
て求めたものと比較して、一定の傾向は無いが大差無い値が得られた。砂粒相当粗度につい
ては、かなりのバラつきが見られ、適正なゼロ面修正を行なう必要性がはっきりした。

今回は深く検討しなかったが、(1)式適用に際しては、先ず第一に個々の粗度要素の効果が
一様となる様な高さを特定する必要が有る。換言すれば、 Ω 形渦管(カルマン渦)の生成さ
れる領域より上の領域に(1)式を適用すべきであると言う事になる。また、水面近傍につい
ても注意を払う必要が有る。それらについては、従来までの乱れの解析に加えて、物理モデル
を想定した観測に基づく研究が必要となるが、今後の課題としたい。

末筆ながら、本研究を進めるにあたり御指導を頂いた広島大学余越正一郎教授、計器類の
便宜を図って頂いた信州大学富所助教授に感謝の意を表する。

考 考 文 献

- 1) 足立昭平：流れの抵抗則，水工学シリーズ 67-02，(1967)。
- 2) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究 (2)，京大防災研究所年報，第
20号B-2，pp.331-354，(1977. 4)。
- 3) Monin, A. S. and Yaglom, A. M. : Statistical Fluid Mechanics. Mechanics of Turbule-
nce, vol 1. (MIT press), (1965).
- 4) 余越正一郎：河川乱流，水工学シリーズ 77-01，(1977)。
- 5) 吉川秀夫：河川工学，朝倉書店，(1980)。