

25 球状粗度要素に関する実験的研究

名古屋大学工学部 正員 足立昭平

〇伊藤 弘慶

本研究は相対粗度（粗度要素寸法の水深に対する比）の大きい山地河川における流水の抵抗則を見出す諸口として、球状粗度要素の抵抗特性を実験的に検討しようとするものである。

1. 実験方法： 実験水路は長さ13m、水路幅30cmの長方形断面をもつメタアクリル製の可変勾配水路である。球状粗度要素として、平均径 $d=4.6\text{mm}$ のガラス球を用い、これを水路床面に敷詰め、接着剤で固定した。今回の実験条件は、水路勾配 $S_0=0.02, 0.01$ および 0.005 の3種類で、流量 $Q \approx 2 \sim 17\%$ である。水位の測定には電気抵抗式自記水位計を用い、2m間隔の2測点において水表面の変動を記録し、水面勾配は両測点の平均水位差から、また水深はこれらの平均値から求めた。なお、速さ分布の対数則を確かめるために、両測点の中点でピトー管による流速分布測定も同時に行なった。

2. 実験結果： 実験おは右表の17種であって、それぞれの摩擦勾配、平均水深および水面変動の標準偏差の測定値を示す。実験Ⅲの流れは低下背水の状態にあり、摩擦勾配が河床勾配をかなり上回っている。このことは、この場合の測点選定がかならずしも適当でなかったことを物語っており、後述のようにこれらの実験値は考察の段階に検討の余地を残した。なお、全実験における水温は 12°C であり、流水の動粘性係数 $\nu=1.31 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ である。

3. 実験値の考察： 本実験では水路側壁を滑面のままにしてあるから、水路潤辺の抗力はもっぱら底面の粗さに依存するものと考えてよいであろう。二次元乱流における速さ分布の基本形として、対数速さ分布則をとれば

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{y}{y_0} \quad (1)$$

実験番号 No.	水路勾配 S_0	流量 $Q(\%)$	摩擦勾配 S_f	平均水深 $\bar{H}(\text{cm})$	水面変動 標準偏差 $\bar{\sigma}(\text{cm})$
I-1	0.020	2.35	0.0200	1.81	0.07
I-2	0.020	4.08	0.0201	2.62	0.06
I-3	0.020	7.83	0.0205	3.56	0.11
I-4	0.020	9.34	0.0205	4.01	0.12
II-1	0.010	2.40	0.0113	2.22	0.07
II-2	0.010	3.87	0.0116	2.96	0.07
II-3	0.010	8.28	0.0100	4.45	0.12
II-4	0.010	16.37	0.0100	6.74	0.23
II-5	0.010	2.45	0.0110	2.14	0.07
II-6	0.010	10.74	0.0102	5.16	0.11
II-7	0.010	12.66	0.0099	5.60	0.16
III-1	0.005	1.54	0.0067	2.11	0.06
III-2	0.005	4.42	0.0079	3.69	0.09
III-3	0.005	8.75	0.0093	5.80	0.17
III-4	0.005	9.08	0.0089	5.77	0.14
III-5	0.005	13.36	0.0088	6.98	0.31
III-6	0.005	17.32	0.0092	8.58	0.33

である。ここに、 u は水路壁面から y の距離における流速であり、 u_* は摩擦速度、 K は Kármán 定数また y_0 は壁面近傍の乱れに関する積分定数である。球状粗面要素をもつ粗面については、次元解析から、

$$\frac{y_0}{d} = f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (2)$$

が期待される。ここに、 d は球状粗面要素の径、 ν は流水の動粘性係数である。したがって、(1)式は

$$\frac{u}{u_*} = A + \frac{1}{K} \ln \frac{y}{d}, \quad \text{ここに、} A = \ln \left\{ f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \right\} \quad (3)$$

あるいは、水深 H について積分して、

$$\frac{U}{u_*} = A - \frac{1}{K} + \frac{1}{K} \ln \frac{H}{d}, \quad \text{ここに、} U = \frac{1}{H} \int_0^H u \, dy \quad (4)$$

となる。Nikuradse の砂粒粗面円管流の実験によれば、上式における A は $u_* d/\nu > 100$ に対して一定値 8.5 をとることが知られている。なお $K = 0.4$ である。

前表に示した実験値を二次元流れと見なして算定した A の値は図-1 のようである。実験 I および

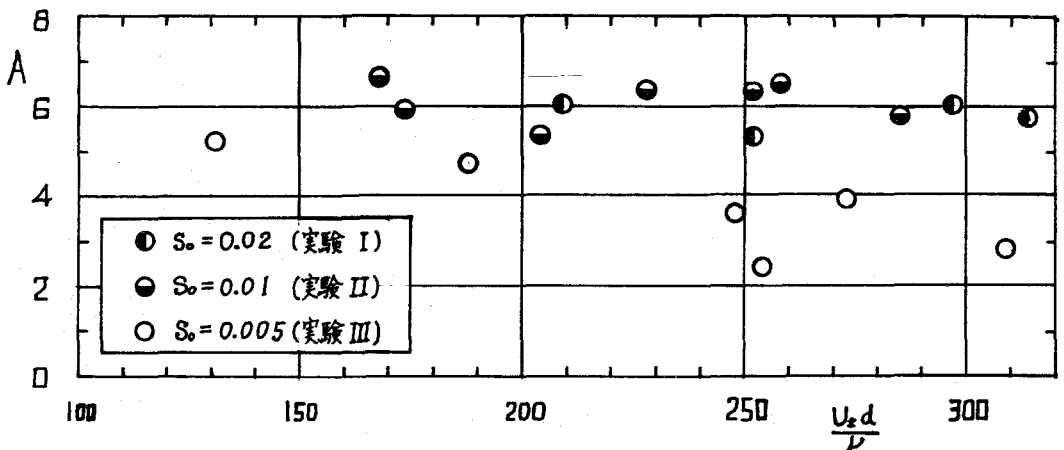


図-1 $A \sim u_* d / \nu$

II における A の値はほぼ一定値 6.0 と認定される。この結果は Nikuradse の砂粒粗面のそれと値はやや小さいけれども、壁面レイノルズ数 $u_* d / \nu > 100$ に対して一定値をとるという点では一致し、球状粗面要素は Nikuradse の砂粒粗面と同様の抵抗特性をもつと考えてよいであろう。実験 III は、 $u_* d / \nu$ の増大とともに A が減少する傾向を示しているが、前述のように、この場合の測点選定に若干の疑義が残されており、なお検討を要するであろう。

Nikuradse の砂粒粗面とさらに直接的に對比するため、これらの相当砂粒粗面 k_s と粒径 d との比を相対水深 H/d に対してプロットすれば、図-2 が得られる。図-1 の結果から当然のことではあるが、実験 III を除けば、 k_s/d はほぼ一定値となり、平均値は 2.7 である。Nikuradse の砂粒粗面は相対水深 15 ~ 507 に相当し、本実験の相当砂粒粗面 k_s が粒径より大きいことは、おそらく相対水深の小さいことと自由表面の存圧によるものである。

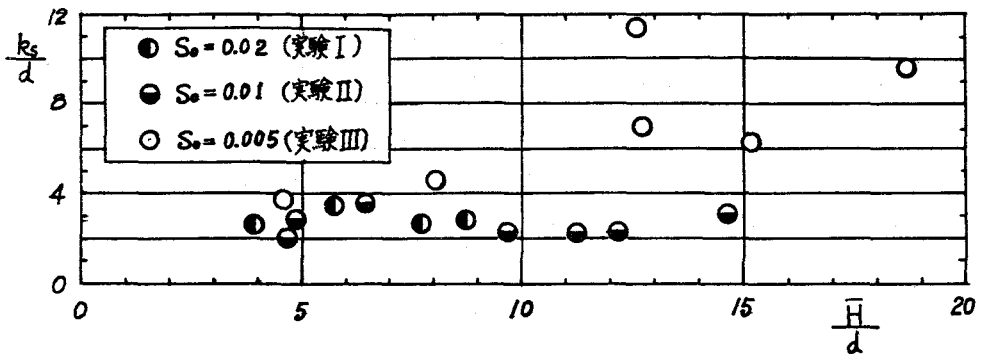


図-2 $k_s/d \sim H/d$

なる、図-3は水面の変動が流水の乱れの大きさに関連すると考え、変動の標準偏差 $\bar{V}$ の水深 $\bar{H}$ に対する比をレイノルズ数 $Re = \bar{U}\bar{H}/\nu$ に対してプロットしたものである。同図には参考値として同じ水路で粗面をとり去った滑面流の水面変動も記入してある。粗面流の水面変動が滑面流のそれよりも大きいことは常識的であるが、本実験の範囲では $\bar{V}/\bar{H}$ の値はほぼ 0.02 ~ 0.04 で、水面変動に特別の傾向は認められなかった。

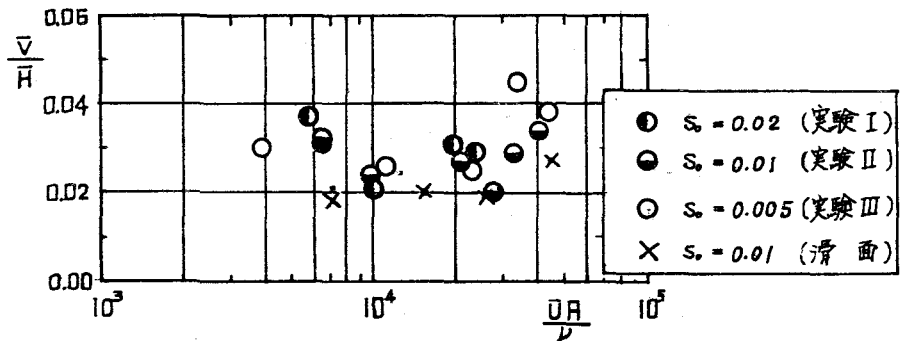


図-3 $\bar{V}/\bar{H} \sim \bar{U}\bar{H}/\nu$

以上、急勾配山地河川の抵抗則に関する基礎的実験の一端を述べたが、本実験結果を要約すれば、球状粗面要素の抵抗特性は、相対粗面の比較的大きい場合にも対数則が成立し、壁面レイノルズ数が 100 以上に対して、摩擦係数は相対水深 H/d のみの関数となる。しかしながら、相対水深の大きい Nikuradse の砂粒粗面に比較して、その相対砂粒粗面は粒径の 2.7 倍の程となる。