

○早稲田大学大学院 学生員 川端 淳一  
 水資源開発公団 正員 水野 義之  
 早稲田理工学部 正員 吉川 秀夫

### 1. はじめに

本研究は粒状体の集合流動機構を解明するため、内力の変数が少ない粒子のみの流動について実験を行ないその内部機構を調べようとするものである。粒状体の内部機構について鈴木らはレイノルズ応力に対応する $-\rho \bar{u} \bar{v}$ が抵抗力としてほとんど働いていないことを明らかにした。そこで著者らは粒状体を層流に対応するものとみなし、その空隙率に注目することによって抵抗力を明らかにしようと考えた。

### 2. 実験方法

幅5cm長さ2mのアクリル製可変勾配水路に、粒径0.5cm、密度 $\rho$  2.5 g/cm<sup>3</sup>の均質なガラスビーズを流した。粒子流厚(水深に相当)の調節には上流の給砂部に設けたゲートを上下させることによって行ない、河床には相度として前述のガラスビーズを敷きつめ固定床とした。流動が発生し定常状態と見なされた後、約1.5m下流地点の流動状態をビデオで追い流速分布を測定する一方、下流端で流量を重量法によって求めた。

粒状体の平均空隙率 $E$ を、実測した流量と流速分布図から求めた見かけの体積流量との比を1から引くことによって求めた。

### 3. 結果及び考察

実験諸量を表1に示す。流速分布は図1に示すように2つのCaseにはつきりと二分された。すなわち勾配を急にしゲートを下げると平均流速の大きい直線分布形状(Case I)を示し、勾配を緩くあるいはゲートを上げていくと急激に平均流速の小さい曲線分布形状(Case II)となるのである。Case Iの場合河床に対して鉛直下向きに沈降しようとする重力成分に比して、河床の相度などによって粒子自身が乱れ衝突し、あるいはことによって生じるいわば分散力が大きく、よって平均空隙率が高くなるが、一方Case IIの場合、逆に沈降しようとする力が大きく平均空隙率は低くなると考えられる。

そこで著者らは流動機構の解明には粒状体内の空隙率の分布を明らかにすることが不可欠と考え、以下のような過程でその算定を試みた。まず流れ全体に注目しその平均速度勾配が平均空隙率と流れ方向に働く重力成分によって決まるとして、図2.3を描きそれより次のような実験式を導いた。

$$\frac{V_{\max} - V_{\min}}{h} = C(E - E_0) I \quad (1)$$

[ $E_0 = 0.26$ ]

$V_{\max}$ : 最大流速  $V_{\min}$ : 最小流速

$E$ : 平均空隙率  $E_0$ : 最小空隙率  $I = (\sin \theta - \sin 23.5^\circ)$ ,  $\theta = 23.5^\circ$ : 流動発生の際の角度

$C$ : ( $= 221, [5^\circ]$ ) の次元をもつ定数,  $h$ : 粒子流厚

次にこの式を図4に示すように流れの各部に適用させ、それぞれの平均空隙率 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_k$ を得、さらに各部の部分空隙率 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_k$ を次式により算定する。

表-1 実験諸量

| 粒径<br>[mm] | Run | 流速分布<br>形状  | case    | 上流端<br>から高さ<br>[cm] | 相対流速<br>[cm/s]       | 平均流速<br>[cm/s]         | 平均流速<br>[cm/s]   |
|------------|-----|-------------|---------|---------------------|----------------------|------------------------|------------------|
| 32.5       | a   | 1-5         | I       | 5-8                 | 5-5.5                | 0.7-0.9                | 126-143          |
| 30.0       | b   | 1-6<br>7-10 | I<br>II | 5.5-8<br>8-10       | 4.5-5.5<br>5.5-7     | 0.68-0.77<br>0.34-0.49 | 77-89<br>35-61   |
| 27.6       | c   | 1-2<br>3-13 | I<br>II | 4-4.5<br>5-10       | 3.5-4.5<br>4.25-6.25 | 0.78-0.85<br>0.32-0.42 | 65-77<br>213-233 |
| 25.1       | d   | 1-6         | I       | 4-6                 | 3.25-3.75            | 0.32-0.38              | 105-110          |

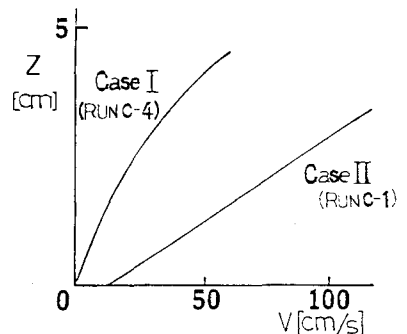


図1 流速分布

$$E_k = k E_k - (k-1) E_{k-1} \quad (2)$$

この結果  $E$  分布は各勾配で同じ傾向を示したものでそれをまとめて表したのが図5である。同図より Case I の場合には  $e$  の値が  $h$  によらず一定となり、Case II の場合には  $E$  分布も曲線分布となることがわかった。又これらの結果を図6に示す  $\sqrt{V}^2$  分布と比較してみると Case I, II とともにほぼ同様の傾向を示し  $E$  分布は  $\sqrt{V}^2$  分布に対応しているのがわかる。(注:  $h$  は方向の速度の乱れ) ここで  $E$  分布を関数化した式を示しておく。

$$\begin{aligned} b: (\text{Case I}) \quad e &= 0.66 & b: (\text{Case II}) \quad e - e_0 &= e^{-(0.8h+0.18)} \\ c: e - e_0 &= e^{-(0.6h+0.98)} & d: \quad e - e_0 &= e^{-(0.76h+1.12)} \end{aligned} \quad (3)$$

$e_0$ : 最小空隙率 = 0.26  $e$ : 自然対数 (なお  $c, d$  は Case II)

間部は粒子流にニュートン流体の流動法則

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \tau: \text{せん断力} \quad \mu: \text{粘性係数} \quad (4)$$

をあてはめ  $\mu$  が  $e$  の変化に対応すると考えている。本研究の

Case II においては、粒子どうしの摩擦力が衝突とともに流動に対する抵抗として働いていること、 $\tau$  の算定も  $E$  分布を用いれば可能なこと、さらにニュートン流体の仮定を用いて各 RUN の  $\mu$  分布を算定することとした。

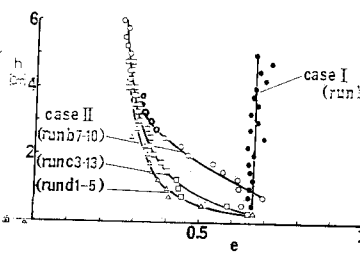


図5  $E$  分布

$$\mu_k \frac{du}{dh} = \rho g h (1 - E_k) \sin \theta \quad \left( E_k = \frac{\int_0^k e dh}{h} \right) \quad (5)$$

式(5)によって求めた  $\mu$  が  $e$  の値で決まることを示したのが図7である。これを関数化すると次のようになる。

$$\mu = 70 (e - e_0)^{-1.1} \quad (6) \quad e_0: \text{最小空隙率} = 0.26$$

以上のとおり  $\mu$  が  $e$  によって決まり、さらに  $\mu$  に応じて流動体内部に働く抵抗力が決まると考えられる。なお Case I の場合の  $\tau$  の値を  $\rho g h (1 - E) \sin \theta / 2 = \text{一定}$  と仮定し算出した  $\mu$  の値を図中にプロット“●”で示してある。ほぼ式(6)の傾向にのっている。

#### 4. おわりに

本研究では粒子のみの流動体について、空隙率が内部の抵抗力に与える影響が非常に大きいことがわかった。今後は空隙率分布を異なつた条件でそれぞれ定量的に求めること、Case I でのせん断力、などについての問題を解決し、水との混合流の場合に適用していく必要があると思われる。

参考文献 1)「急勾配水路における集合流動に関する実験的研究」『第26回水理講演会論文集』(阿部ら)

2)「粒状体の集合流動機構について」『第38回年次講演会論文集』(鈴木ら)

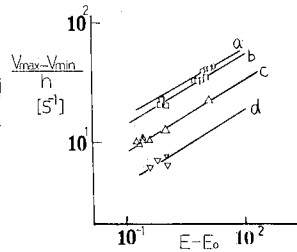


図2 平均速度勾配と平均空隙率の関係

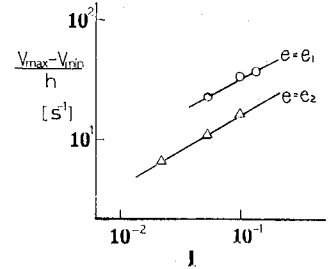


図3 平均速度勾配と勾配の関係

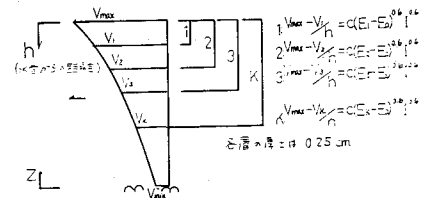


図4 式(1)の適用図

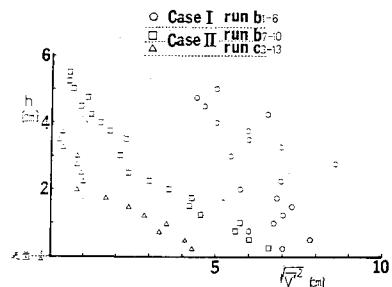


図6  $\sqrt{V}^2$  分布

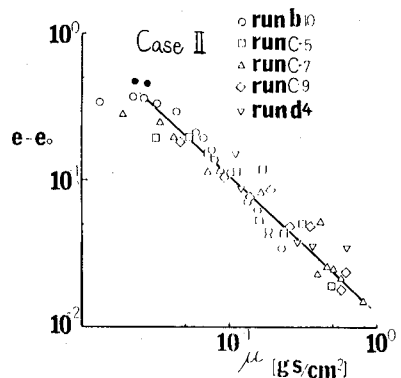


図7  $\mu - e$  の関係