

北大 工学部 正 船木尚行

北大 工学部 正 高桑哲男

## 1. まえがき

本報告は流水中での粒子の沈降実験とこない。粒子の平均沈降速度や粒子速度の変動特性と、流れの場の状態と粒子特性との関係を実験的に検討したものである。

## 2. 実験条件および実験方法

長さ3mのアクリル製開水路を用い、水深を約7cmに定め、断面平均流速 $u$ 、底面粗度 $h$ 、流体の粘性を変化させることにより、様々の水理条件が得られた。表-1に実験条件の組合せを示す。流れの状態は二次元ホットフィルム流速計で計測され、平均流速、乱流強度が求められた。また乱れの平均スケールは自己相関関数より、エネルギー消費率は乱れのスペクトルより計算された。

また、粒子の軌跡を測定する領域は、流速計による測定の結果ほぼ一致とみなせることが確認された。

実験に用いた粒子はポリ球(P)、活性炭粒(A)、ガラス粒子(G)の3種類で、ふり分けによって得られた粒子の粒径分布 $\phi_p$ は、それぞれほぼ正焼分布をしていた。表-2に粒子の性質を示す。それぞれの粒子の沈降速度式の妥当性は、実験の沈降速度分布と粒径分布から計算された沈降速度分布がほぼ重なることにより確認された。

各水理条件における粒子の沈降状態を測定するためストロボを用いた写真撮影がおこなわれた。粒子の軌跡の測定より、粒子の平均沈降速度 $\bar{V}_{pz}$ 、乱れ強度 $\bar{V}_p^2$ は次のようにして求められた。同一条件についてM回の試行をおこない、ある試行において、図-1に示されるように $\Delta X_i$ 、 $\Delta Z_i$ を測定し、 $\bar{V}_{pz} = \frac{1}{M} \sum \Delta Z_i / \Delta t$  (1)、 $\bar{V}_{px} = \frac{1}{M} \sum \Delta X_i / \Delta t$  (2)、 $\bar{V}_{py} = \frac{1}{M} \sum \Delta Y_i / \Delta t - \bar{V}_{px}$  (3)、 $\bar{V}_{pz}^2 = \frac{1}{M} \sum (\Delta Z_i / \Delta t - \bar{V}_{pz})^2$  (4)、 $\bar{V}_p^2 = \frac{3}{2} (\bar{V}_{px}^2 + \bar{V}_{py}^2 + \bar{V}_{pz}^2)$  (5)として計算し、 $\bar{V}_{pe} = \frac{1}{M} \sum \bar{V}_{pz}$  (6)、 $\bar{V}_{pe} = \frac{1}{M} \sum \bar{V}_{pz}$  (7)、 $\bar{V}_p^2 = \frac{1}{M} \sum \bar{V}_p^2$  (8)として所定の値が計算された。本実験においてNは30~40、Mは15~30、 $\Delta t = 0.0125$ 秒がとられた。図-2に示されるようにNの値が30~

表-1 実験条件

| Mark  | u<br>(cm/sec) | h<br>(mm) | Fluid               |
|-------|---------------|-----------|---------------------|
| 30 S  | 3.33          | smooth    | Water               |
| 30 R1 |               | 1         |                     |
| 30 R2 |               | 5         |                     |
| 50 S  | 5.56          | smooth    |                     |
| 50 R1 |               | 1         |                     |
| 50 R2 |               | 5         |                     |
| 70 S  | 7.84          | smooth    |                     |
| 70 R1 |               | 1         |                     |
| 70 R2 |               | 5         |                     |
| 50 V  | 5.56          | smooth    | Methyl Cellulose 2% |
| 70 V  | 7.84          |           |                     |

表-2 粒子の性質

| Mark | particle | density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\bar{r}_p$<br>( $\mu$ ) |
|------|----------|---------------------------------|--------------------------|
| P 1  | P        | 1.040                           | N(710,40)                |
| P 2  |          |                                 | N(420,20)                |
| P 3  |          |                                 | N(100,20)                |
| A 1  | A        | 1.485                           | N(870,60)                |
| A 2  |          |                                 | N(440,20)                |
| A 3  |          |                                 | N(100,20)                |
| G 1  | G        | 2.445                           | N(1120,20)               |
| G 2  |          |                                 | N(350,40)                |
| G 3  |          |                                 | N(100,30)                |

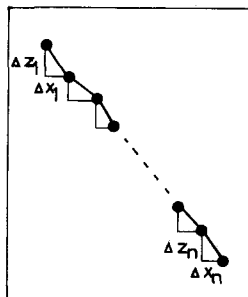


図-1 粒子軌跡の模式図

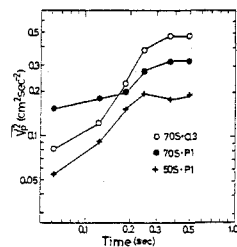


図-2  $\bar{V}_p^2$  の変化

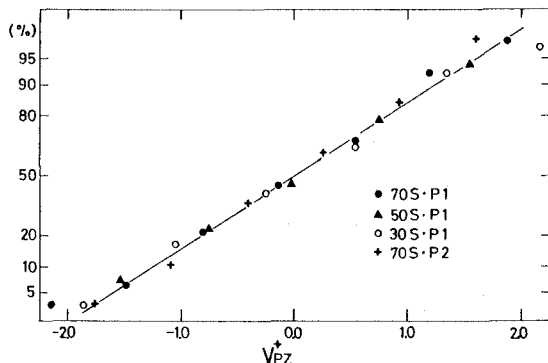


図-3 粒子速度変動の確率分布

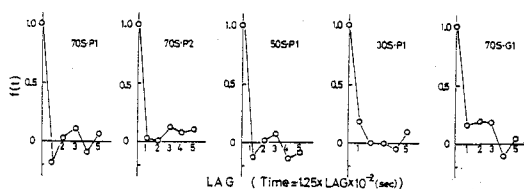


図-4 自己相関関数

40 (0.375 ~ 0.5 秒) で  $\bar{V}_p$  の値が一定になることが確認された。

### 3. 実験結果および考察

3-1 粒子速度の変動特性 粒子速度の変動特性は滑面の場合について検討された。図-3 に示されるように、粒子の乱れ速度の確率分布はほぼ正規分布になるという結果が得られた。(図-3 において  $V_{p2} = (V_{p2} - \bar{V}_{p2}) / \sqrt{\bar{V}_{p2}}$ ) また速度変動の自己相関関数  $\gamma(\tau)$  は、観測時間が短いので正確な形をもとめることができなかったが、ラグが 0.0625 秒程度までの相関関数の値は図-4 に示されるように小さな値となり、ほとんど相関がないという結果が得られた。最小 FPE 法で自己回帰式の項数をもとめると、多くのデータが項数 0 という結果をみたえた。以上から、本実験の範囲では粒子速度の変動は正規白色雑音とみなし得るものと考えられた。 $\bar{V}_p$  は図-5 に示されるように乱れ状態についてエネルギー消費率と粒子径  $D$  の積で整理されたとの関係が見い出された。

$$\bar{V}_p^3 \propto (\varepsilon \cdot D)^{3/2} \quad (9)$$

(9) 式の関係はクホイ<sup>(11)</sup>によって得られた関係と一致している。また今本<sup>(12)</sup>によって乱れの乱流強度  $\bar{V}^*$  は  $\bar{V}^* \propto (\varepsilon L)^{1/2}$  の関係が与えられており  $\bar{V}_p$  と  $\bar{V}^*$  の比は次の関係で整理されることを予想される。

$$\bar{V}_p / \bar{V}^* \propto (D/L)^{1/2} \quad (10)$$

図-6 に  $\bar{V}_p / \bar{V}^*$  と  $D/L$  の関係を示す。(10) 式の関係がほぼ成立することを確認される。

3-2 粒子の平均沈降速度 静水中の沈降速度  $W_p$  と流水中の平均沈降速度  $\bar{V}_{p2}$  の比を  $W_p$  で代表速度にとり、 $Re$  数 ( $Re_{wp} = D \cdot W_p / \nu$ ) で整理し、底面の粗度別に図-7 に示した。 $Re_{wp}$  が大きいほど、底面による乱れが小さいほど、沈降速度の減少割合が小さくなる傾向をみることが可能である。

流れの乱れの状態を平均スケール、乱流強度を代表スケールにとり、 $Re$  数 ( $Re_s = L \sqrt{\bar{V}} / \nu$ ) で代表させ、 $\bar{V}_{p2} / W_p$  の値を  $Re_{wp} - Re_s$  平面上で整理すると図-8 のように表わされた。この整理によって対象とする粒子、流れの場の特性がわかれれば、平均沈降速度を推定することがある程度可能と思われるが、実測された平均沈降速度の値はバラツキが大きく、また乱れの特性の表現に任意性もあるため、一層詳しい検討が必要であると考えられる。そのために、流水中の沈降速度に関する多くのデータの集積、粒子の運動方程式を基礎にした解析が必要であろう。

(11) クホイ 1964 J.C.E.J. Vol.3, No.4, 1972, p.149

(12) 今本 土木学会論文報告集 第197号, 1972, p.83

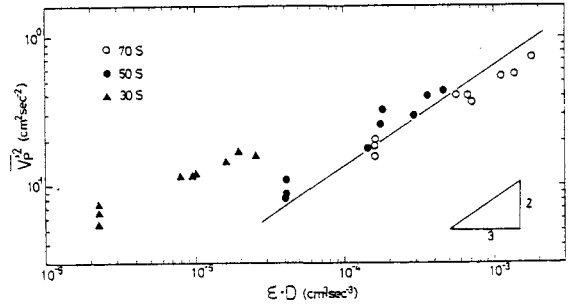


図-5  $\bar{V}_p^3$  と  $\varepsilon \cdot D$  の関係

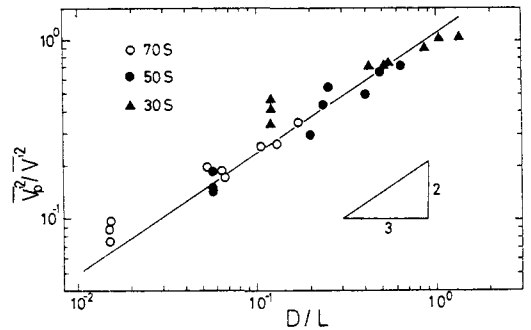


図-6  $\bar{V}_p / \bar{V}^*$  と  $D/L$  の関係

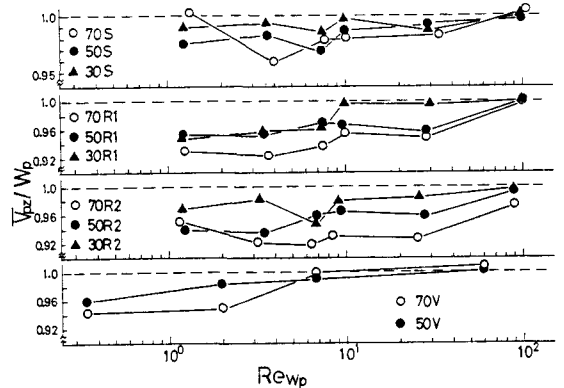


図-7  $\bar{V}_{p2} / W_p$  と  $Re_{wp}$  の関係

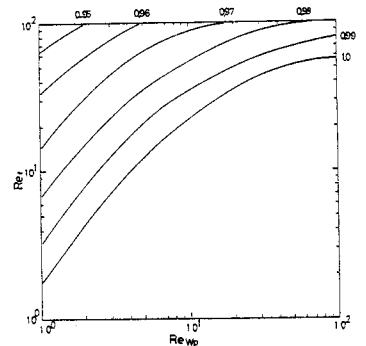


図-8  $\bar{V}_{p2} / W_p$  の  $Re_{wp} - Re_s$  平面上分布