

乱流境界層における浮遊粒子の沈降速度に関する研究

広島大学 学生会員 ○塩崎遼平

広島大学 正会員 川西澄

1. はじめに

流体中における浮遊粒子の挙動を理解することは海底の高濁度層の形成過程や赤潮の発生等，環境に関わる多くの現象を解明する上で重要である．自然界での流れはその殆どが乱流であり，乱流境界層内での浮遊粒子の挙動を理解することが重要である．特に，浮遊粒子の沈降速度はその輸送過程を考える上で重要である．既往の研究では，格子板を静水中で振動させ乱流状態を作り，その中で粒子の沈降速度を測定しているものが数例見られる．Murray¹⁾は，格子振動により発生させた乱流中で微粒子の沈降速度を測定した．それによると，流体の密度より大きな密度の粒子において，弱い乱流中では粒子の沈降速度は静水中と比べて20~40%減少するが，乱流強度が増加すると沈降速度が増加するという結果を示している．本研究では，これまで行われてきている格子振動による乱流状態ではなく，実験用開水路において，実際の流れの中での粒子の沈降速度を測定し，乱流境界層内において乱れの強さが粒子の沈降速度にどのように影響しているのかを調べることを目的である．

2. 実験方法

本研究では，長さ28 m，幅0.8 mの開水路(水路床勾配 1/1000)を用いて，充分発達した乱流境界層内の粒子および水の速度(3成分)を測定した．開水路流れの中に粒子を投入し，その速度を超音波ドップラー流速計（以下 ADV）で測定することにより，流体の乱れ強度と粒子の平均沈降速度の関係を明らかにする．測点位置は水路上流端より 18 m 下流である．粒子は流れの中に水平に設置したチューブを通じて投入した．実験に使用した粒子は表-1 に示す7種類であり，それぞれについて粒径試験と密度試験を行った．ADV のサンプリング周波数は 20 Hz で測定時間は1データにつき 20 分間とし，その平均値を平均沈降速度 $\bar{w}_p$ の値とした．実験は，水路床に何も置かない状態（Smooth bottom）と，水路床に粗度を設置した状態（Rough bottom）で行った．

3. 結果・考察

実験で使用した各粒子 P1~P7 のパラメータを表-1 に示す．静水中の沈降速度 w_0 は，高さ 1 m のアクリル性沈降塔内で粒子を沈降させて ADV で測定した値である．本研究では実験より測定した粒子の沈降速度 $\bar{w}_p$ とその標準偏差 σ_p を静水中の粒子の沈降速度 w_0 により無次元化した相対沈降速度 $\bar{w}_p/w_0$ と相対乱流強度 σ_p/w_0 の関係を調べることで粒子の沈降速度に対する乱れの影響を考える．図-1 に $z=3(\text{cm})$ と $z=18(\text{cm})$ における相対沈降速度と相対標準偏差の関係を示す． $z=18(\text{cm})$ では P1, P2 とともに $\sigma_p/w_0 < 1$ であり相対沈降速度のばらつきは小さいが，底面に近い $z=3(\text{cm})$ では $z=18(\text{cm})$ の場合と比べて相対沈降速度のばらつきが大きく ss-152 においては相対標準偏差が 1 を超えている． $z=3(\text{cm})$ と $z=18(\text{cm})$ での相対沈降速度のばらつきを見るために各々の相対沈降速度の標準偏差 σ をとると， $z=3(\text{cm})$ では $\sigma = 0.34$ ， $z=18(\text{cm})$ では $\sigma = 0.22$ となる．このことより，流れの上層部に比べ，底面付近では乱流強度が強く沈降速度への影響が大きいと考えられる．P1 から P7 における相対沈降速度 $\bar{w}_p/w_0$ と相対乱流強度 σ_p/w_0 の関係を図-2 に示す．図-2 より，相対乱れ強度が $\sigma_p/w_0 < 1$ では， σ_p/w_0 の増加とともに粒子の沈降速度は静水中より減少し， $\bar{w}_p$ は w_0 に比べ最大 80%程度減少する． $1 < \sigma_p/w_0 < 9$ では， $\bar{w}_p/w_0$ の値はばらついているが，粒子の Stokes 応答時間 τ_p が関係していると考えられる． τ_p は以下の式-(1)で表される粒子に固有の値である．表-2 に P1 から

表-1 各粒子のパラメータ

	粒径 $d_p(\text{mm})$	密度 ρ_p (g/cm^3)	終末速度 $w_0(\text{mm}/\text{s})$
P1	0.21	2.65	22.4
P2	0.5	1.06	5.08
P3	0.07	3.13	12.7
P4	0.051	3.13	6.85
P5	0.033	3.13	2.65
P6	0.07	2.63	3.93
P7	0.04	2.63	1.39

P7 の τ_p を示す. 表 2 と図-1 より, τ_p が大きい粒子は $\bar{w}_p/w_0$ が小さく, τ_p が小さい粒子は $\bar{w}_p/w_0$ が大きい傾向があると考えられる. $9 < \sigma_f/w_0$ では, 過去の研究結果¹⁾²⁾と同様に σ_f/w_0 の増加とともに急激に平均沈降速度が増加する傾向を示す. また, 図-1 に示した実線は最小二乗法で求めた近似曲線で式-(2)で表される. これによれば, 相対沈降速度が 1 となる時の相対乱れ強度は約 3.1 である.

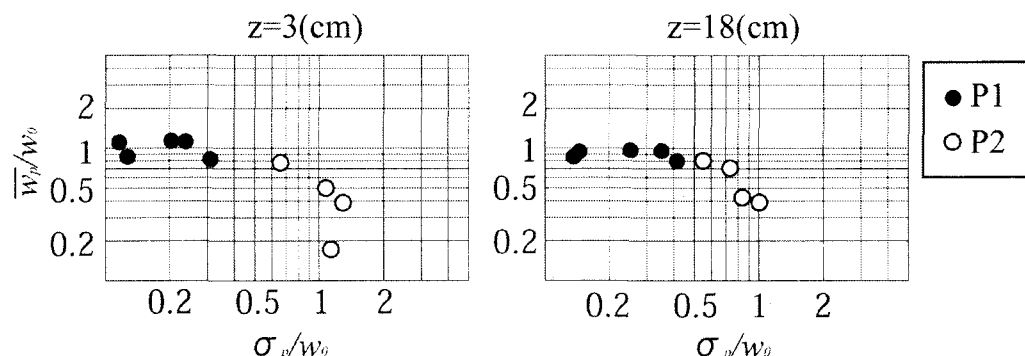


図-1 $z=3(\text{cm})$ と $z=18(\text{cm})$ での相対沈降速度と相対標準偏差の関係

表-2 各粒子の τ_p 値

	Stokes 応答 時間 $\tau_p(\text{ms})$
P1	6.5
P2	14.7
P3	0.85
P4	0.45
P5	0.19
P6	0.72
P7	0.23

$$\tau_p = \rho_p d_p^2 / 18\mu \quad (1)$$

$$\frac{\bar{w}_p}{w_0} = \frac{1 + \frac{1}{3.1} \left(\frac{\sigma_f}{w_0} \right)^2}{1 + \frac{\sigma_f}{w_0}} \quad (2)$$

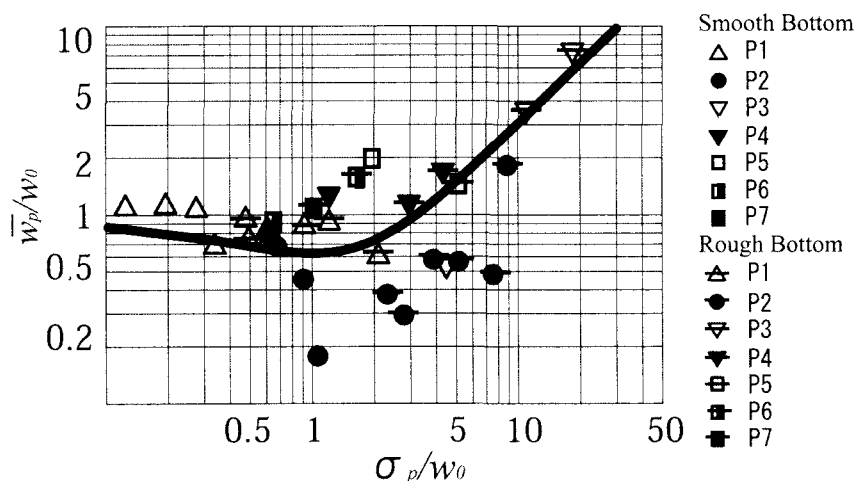


図-2 相対沈降速度と相対標準偏差の関係

4. まとめ

粒子の沈降速度は乱流渦によって影響を受ける. 乱流強度が $\sigma_p < 1$ では沈降速度 $\bar{w}_p$ は減少傾向を示すが $1 < \sigma_p$ では増加傾向を示し, 特に $9 < \sigma_p$ では急激に増加する. また, $1 < \sigma_p < 9$ では沈降速度の値がばらついているが, 粒子の Stokes 応答時間によって傾向が別れることが考えられる.

参考文献 1) Stephen P.Murray: "Settling Velocities and Vertical Diffusion of Particles in Turbulent Water", J.Geophys.Res.Vol.75, No.9, 1970 2) Peter Nielsen: "Turbulence Effects on The Settling of Suspended Particles", J. Sedimentary Petrology Vol.63, No.5, 1992