乱流境界層における固体粒子の沈降速度に関する実験的研究

広島大学大学院　正会員　　川西　澄
広島大学大学院　学生会員　○塩崎　遼平

１．目的

流体内の粒子状物質の輸送を考える上でその平均沈降速度（以下 w_p）は重要なパラメータであるが，例えば，砕波のような強い乱流中の w_p は静水中と大きく異なる可能性がある．等方性乱流中での既往の研究によれば，w_p は流体の乱れ強度 σ_f と粒子の静水中での沈降速度 w_0 の比 σ_f / w_0（相対乱れ強度）によって増加または減少することが示されている．しかし粒子の沈降速度を測定した実験データは乏しく，またそのデータは理想的な等方性乱流中でのものがほとんどであり，乱流境界層のような非等方性乱流中での研究は行われていないのが現状である．本研究では，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．

２．実験方法

本研究では，**図-1** に示すような長さ 28 m，幅 0.3 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 2 種類である．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．ADV のサンプリング周波数は静水中，水路での測定共に 20 Hz で，水路での測定時間は 1 データにつき 20 分間とし，その平均値を平均沈降速度 w_p の値とした．ストークス応答時間 τ_p は $\tau_p = \rho_p d_p^{\,2} / 18\mu$ で求められる．　　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．

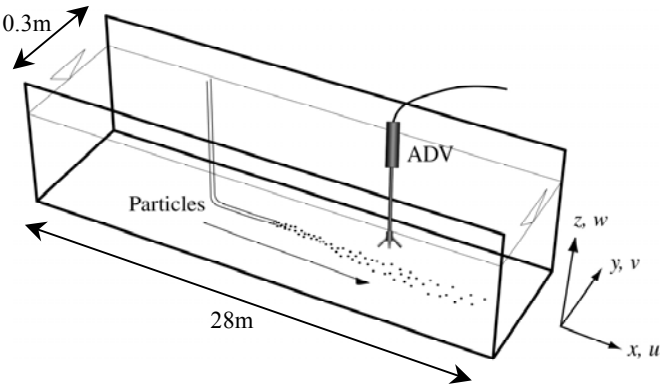

図-1　実験装置模式図

表-1　各粒子の特性量

	Particle diameter d_p (mm)	Spesific density ρ_p	Terminal velocity w_0 (mm/s)	Stokes response time τ_p (ms)
P1	0.09	2.65	6.10	1.00
P2	0.056	2.65	2.60	0.43

３．結果と考察

図-2に相対沈降速度と相対乱流強度の関係を示す．大きな相対乱流強度では，従来の研究(Nielsen, 1993; Friedman・Katz, 2002) と同様，固体粒子の平均沈降速度は静水中より増加しており，最大で静水中の8倍に達している．Nielsen (1993) は $\sigma_p/w_0 < 4$で沈降速度が20-40 %減少する一方で，$\sigma_p/w_0 > 4$では$w_p = 0.4\,\sigma_p$の関係でw_pが増加することを示している．ここで，σ_pは粒子の鉛直速度の標準偏差である．図中の曲線は式(1)で示される近似曲線であり，σ_f / w_0=1.26付近を境に乱流中の粒子の沈降速度が減少から増加に転じることを示している．しかし，幾つかのデータにおいては同程度の相対乱流強度にも関わらず，異なった相対沈降速度を示している．浮遊粒子の運動を特徴づける無次元量として相対乱れ強度に加えてStokes数が考えられる．Stokes数

キーワード　沈降速度　乱流　Stokes数　浮遊粒子　開水路
連絡先　　〒739-8527　東広島市鏡山 1-4-1　広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻　海岸工学研究室

は式(2)で表される，Stokesの応答時間 τ_p と乱れの時間スケール τ_f の比である．**図-3**に断面平均流速が20(cm/s)の時の主流方向及び鉛直方向のエネルギースペクトルを示す．エネルギー散逸率 ε は主流方向及び鉛直方向流速のスペクトルの慣性小領域におけるKolmogorov則から評価した．乱れの時間スケール τ_fは式(3), (4)より求めた．式(3)の σ_uは主流方向の乱れ速度である．**図-4**に相対沈降速度とStokes数の関係を示す．比較のために，同程度の相対乱流強度のデータを破線で結んである．この結果より，同程度の相対乱流強度であってもStokes数の大きさによって沈降速度の増減傾向が異なることがわかる．すなわち，同程度の相対乱流強度であっても，Stokes数が増加すると沈降速度は減少することが示された．

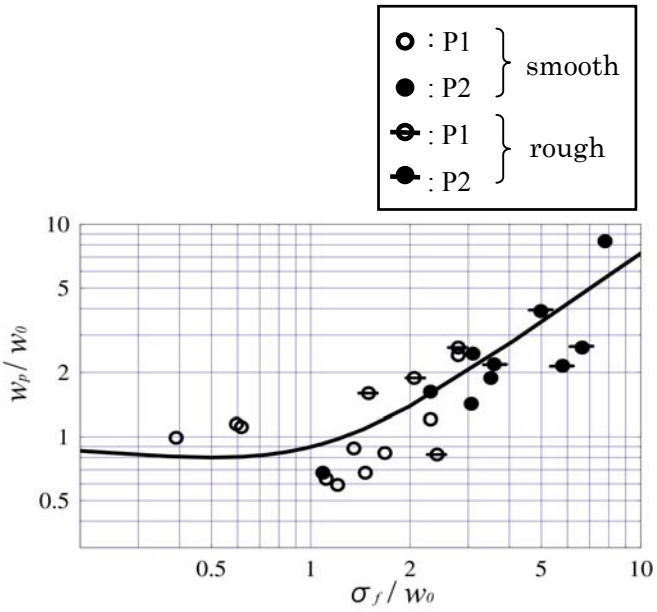

図-2 相対沈降速度と相対乱流強度の関係

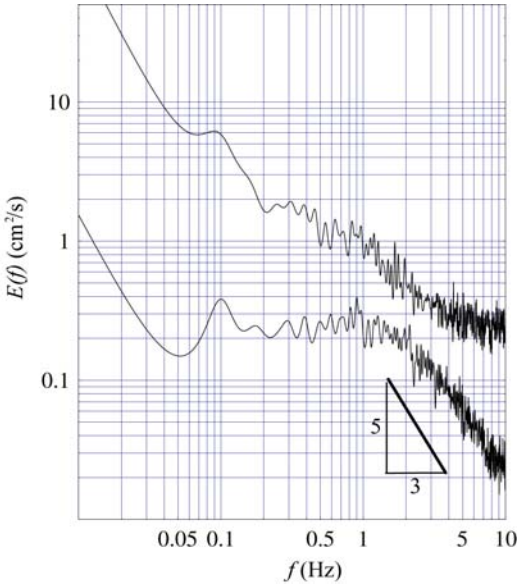

図-3 エネルギースペクトル

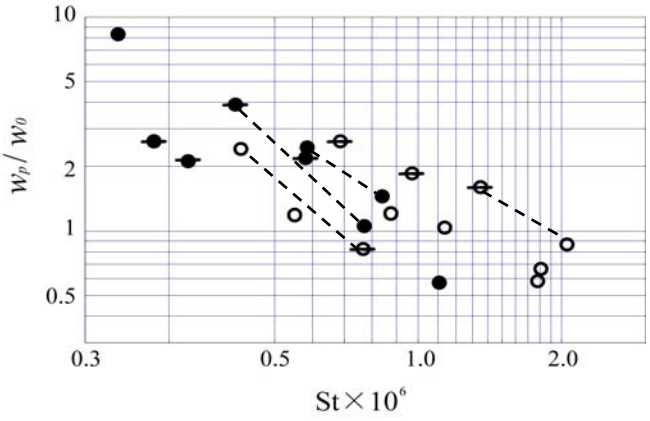

図-4 相対沈降速度と St 数の関係

$$\frac{w_p}{w_0} = \frac{1+\frac{1}{1.26}\left(\frac{\sigma_f}{w_0}\right)^2}{1+\frac{\sigma_f}{w_0}} \qquad (1)$$

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_\lambda} \qquad (2)$$

$$l_\lambda = \sigma_u (15\nu\varepsilon)^{1/2} \qquad (3)$$

$$\tau_\lambda = \frac{l_\lambda}{\sigma_u} \qquad (4)$$

4．結論

乱流中では，浮遊粒子の沈降速度は静水中とは異なっており，乱流強度の増加と共に沈降速度も増加する．また，同程度の乱流強度ではStokes数が増加すると沈降速度は減少し，逆にStokes 数が減少すると沈降速度は増加するという結果が示された．

参考文献

・Friedman, P. D. and J. Katz (2002) : Mean rise rate of droplets in isotropic turbulence, Phys. Fluids, Vol.14,No.9,pp.3059—3073.289.

・Nielsen, P. (1993): Turbulence effects on the settling of suspended particles, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.63, No.5, pp.835—838.