

乱流場における浮遊粒子の沈降・浮上速度に関する実験的研究

Experimental Investigations of Settling and Raise Velocity of Suspended Particles in Turbulent Flows

川西 澄*・益岡 仁志**
Kiyosi Kawanisi and Hitoshi Masuoka

*正会員 工博 広島大学准教授, 大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目)

**正会員 工修 日本水工設計株式会社 (〒104-0054 東京都中央区勝どき3丁目)

The purpose of this study is to clarify the effects of turbulence on the mean and variance of vertical velocity of suspended particles. Experiments were carried out with a turbulence tank and an open channel. Particle's motion was measured using a 3D particle tracking system. The turbulence tank experiments show that at strong turbulence the relative vertical velocity increases with increasing relative turbulence intensity regardless of the Stokes number. At intermediate relative turbulence intensity, the particles at the large Stokes number tend to be slowed, whereas the mean vertical velocity of particles is increased at the small Stokes number. In the open channel, the settling velocity of heavy particles is increased with increasing the relative turbulence intensity; Conversely, the raise velocity of light particles is decreased with increasing the relative turbulent intensity, because fluid motions are dominated by sweeps.

Key Words: Turbulent flow, suspended particle, settling velocity, raise velocity

キーワード: 乱流場, 浮遊粒子, 沈降速度, 浮上速度

1. はじめに

乱流状態にある河川や海様, 大気中における土粒子や大気汚染物質などの浮遊粒子の分布や輸送量の評価精度を上げるためには, 粒子の運動に与える乱流の効果を明らかにする必要がある。静止流体中における粒子の鉛直速度は比重や粒径などの粒子パラメータなどにより容易に推測することができるが, 乱流中では乱流強度などにより, 粒子の平均鉛直速度が変化することがわかっている¹⁻⁹⁾。

海洋や河川工学分野において, 浮遊粒子の挙動は非常に重要であり幾年にもわたってその研究がなされてきた。しかしながら, 流体中の浮遊粒子の挙動はいまだに完全に解明されていないのが現状である。

Murray¹⁾は, 乱流中における粒子の平均沈降速度が, 静水中の沈降速度の0.4~4.5倍の範囲で変化する結果を得ている。Tooby²⁾やNielsen³⁾は, 乱流中における粒子速度変化の要因として図-1に示す2つのメカニズムを挙げている。図-1(a)に示す“vortex trapping”は, 粒子が渦内に取り込まれ, 渦とともに移動することにより粒子の平均鉛直速度が減少するメカニズムである。一方, 粒子速度増加の要因として考えられている“trajectory biasing”は, 図-1(b)に示すように, 粒子が慣性により渦の外縁の下降流部に集中することで, 粒子の平均沈降速度が増加するメカニズムである。

Nielsen は, 渦外縁の下降流部が粒子の平均沈降速度を増加させることに着目し, 沈降速度が増加する軌道を“Fast

tracks”と呼んでいる。

Jobson ら⁴⁾は開水路乱流中に投入した粒径 0.123 mm のガラスビーズの平均沈降が, 静水中の沈降速度よりも40%から65%増加することを見いだしている ($u_s / w_0 = 4.3 \sim 13$)。Kawanisi & Shiozaki⁵⁾は, 静水中の沈降速度がJobson ら⁴⁾のものより1桁小さな微細粒子に関して, 開水路乱流中の平均沈降が, 静水中の沈降速度の数倍に達することを示している。

本研究では, 一様等方性乱流に近い乱流を発生させることができる乱流水槽と壁乱流を発生させる開水路を用いた, 乱流構造の異なる2種類の実験を行い, 乱流中における粒子の平均鉛直速度と乱流や粒子のパラメータとの定量的な関係を明らかにすることを目的としている。

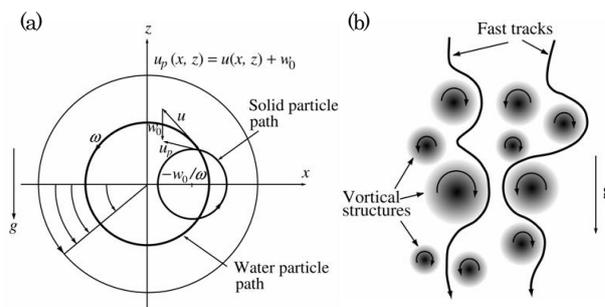


図-1 粒子速度変化のメカニズム
(a) Vortex trapping, (b) Trajectory biasing

2. 粒子の平均鉛直速度に関するパラメーター

無次元化した粒子の運動方程式から相対鉛直速度 \bar{w}_p / w_0 は次式のように表される⁷⁾.

$$\frac{\bar{w}_p}{w_0} = f\left(\frac{\sigma_f}{w_0}, St, \frac{d}{l_e}, R_p\right) \quad (1)$$

ここで、 w_0 は静水中における粒子の鉛直速度、 σ_f は乱れ強度、 d は粒子径、 l_e は乱れの長さスケール、 St はストークス数

$$St = \frac{\tau_p}{l_e / \sigma_f} \quad (2)$$

である。ここで、 τ_p はストークスの応答時間で、粒子の比重を s 、流体の動粘性係数を ν とすると

$$\tau_p = \frac{s d^2}{18\nu} \quad (3)$$

である。 R_p は粒子レイノルズ数

$$R_p = \frac{w_0 d}{\nu} \quad (4)$$

である。

本論文では式(1)のうち、最初の2つのパラメーター(相対乱流強度とストークス数)が相対鉛直速度に与える影響を検討する。

3. 実験

本研究では、一様等方性乱流に近い乱流を発生させることができる乱流水槽実験と壁乱流を発生させることができる開水路実験の乱流構造の異なる2つの実験を行った。

3.1 乱流水槽実験

乱流水槽実験の概略図を図-2に示す。乱流水槽は、Nielsen⁴⁾やYanら⁹⁾が用いたものと同様なもので、幅50 cm×奥行50 cm×高さ60 cmの大きさの水槽内に設置された上下2枚のアルミ製多孔板を上下に振動させることにより水槽内に乱流を発生させた。多孔板の孔の直径は5.2 cm、振動幅は5.2 cmで、振動周期は0.52~1.01秒の範囲で変化させることで水槽内の乱れ強度を変化させた。水槽内に投入した単一粒子は、サンプリング周波数が60 Hzの2台のデジタルビデオカメラで撮影した。図-3にカメラの配置と測定範囲図を示す。2台のカメラ画像データからDLT(Direct Linear Transformation)法¹⁰⁾を用いて粒子の連続した3次元座標を求め、粒子の速度データを得た。各条件・各粒子ごとの繰り返し実験回数は10回で、得られた約1000の粒子速度データを相加平均して粒子の平均鉛直速度を評価した。

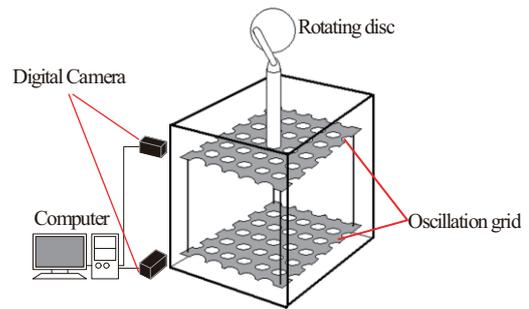


図-2 乱流水槽実験の概略図

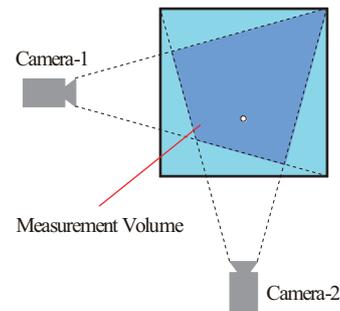


図-3 カメラ配置図と測定範囲

さらに乱流水槽内に発生した乱れを把握するために水槽中央部にてADV(Acoustic Doppler Velocimeter)による流速測定を行った。図-4に各振動周期における鉛直方向と水平方向流速の測定結果を示す。この結果から鉛直方向、水平方向とも大きな平均流は存在しないことが確認できるが、水平方向と鉛直方向で乱れ強度の大きさがやや異なっていることがわかる。表-1に各振動周期における流速変動の標準偏差を示す。鉛直方向流速変動の標準偏差に対する水平方向流速変動の標準偏差の比である u'/w' は0.77~0.84であり、どの振動周期においても等方性から2割程度のズレが存在する。

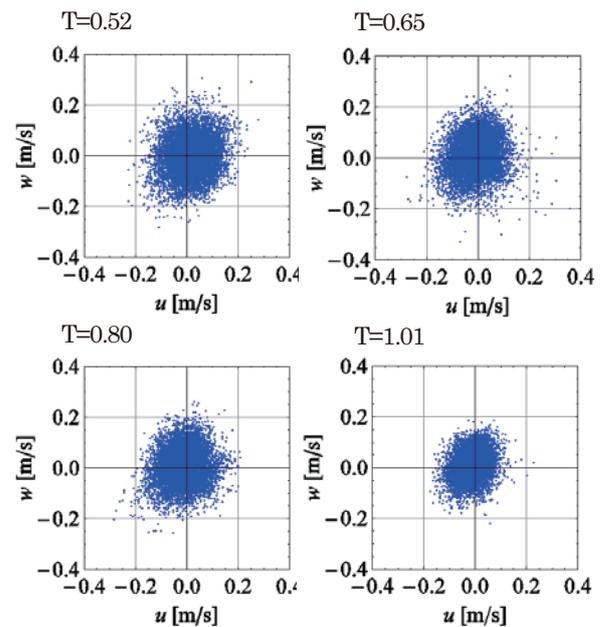


図-4 鉛直方向と水平方向流速の関係

表-1 各振動周期における流速の平均変動

Oscillation period T [sec]	Standard deviation of fluid velocity [cm/s]		
	Vertical w'	Horizontal u'	u'/w'
0.52	6.02	5.05	0.84
0.65	5.75	4.68	0.81
0.80	5.68	4.53	0.80
1.01	4.25	3.28	0.77

乱流水槽においては、平均流が存在しないため、ラグランジュ速度に近いものを測定していると考えられる。図-5に各振動周期 (T=0.52,0.80,1.01)における鉛直方向流速のエネルギースペクトルを示す。この結果からエネルギー周波数スペクトルには慣性小領域における -2 乗則が存在しており、水槽内の乱流は十分に発達していると判断される。さらに、各振動周期において大きなピークがないことから鉛直方向流速に周期的な変動はなく、不規則変動であることがわかる。

表-2に水槽内の乱れ特性量を示す。テイラーの時間スケール τ_λ とテイラーのマイクロスケール l_λ はそれぞれ式(5)、(6)から求めた。

$$\tau_\lambda = \left(\frac{15\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$l_\lambda = \sigma_f \tau_\lambda \quad (6)$$

ここで、 ε はエネルギー散逸率である。

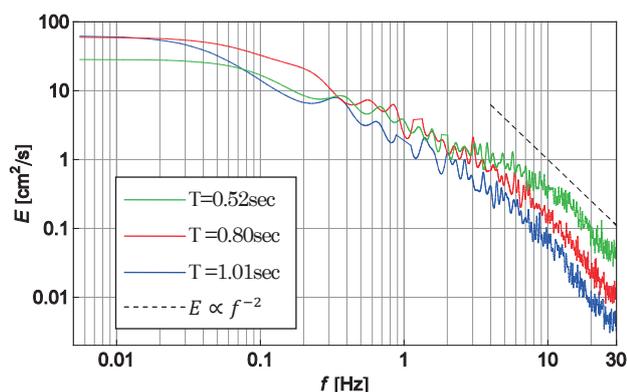


図-5 鉛直方向流速のエネルギースペクトル

表-2 水槽内の乱れ特性量

Oscillation period T [sec]	Turbulence intensity σ_f [cm/s]	Velocity variance σ_f^2 [cm²/s²]	Taylor microscale l_λ [cm]	Taylor time scale τ_λ [sec]
0.52	7.02	49.28	0.465	0.066
0.65	6.85	46.92	0.837	0.122
0.80	6.59	43.43	0.846	0.128
1.01	4.95	24.50	1.275	0.258

3.2 開水路実験

開水路実験の概略図を図-6に示す。開水路は長さ30m×幅0.8m×高さ0.5mであり、底面に粗度を設置することで乱れを大きくし、水路床勾配を変化させることで乱れ強度を変化させた。図-7に底面粗度の概略図を示す。高さ0.01mの角材を0.09m間隔で10mの範囲に設置した。

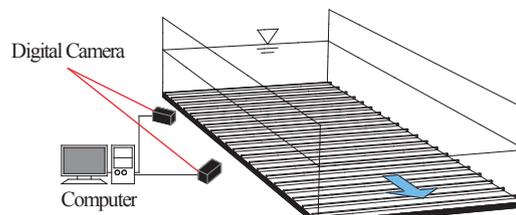


図-6 開水路実験の概略図

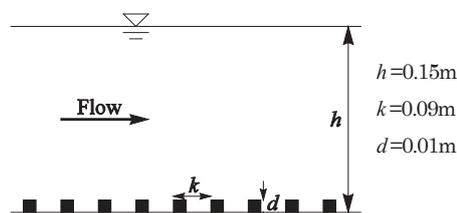


図-7 底面粗度の概略図

水路内に投入した単一粒子を乱流水槽実験と同様の方法で撮影し、粒子の3次元座標を連続的に測定した。水より軽い粒子はビニールチューブを用いて底面付近から投入し、水より重い粒子は水面付近から投入した。図-8にカメラの配置と測定範囲図を示す。

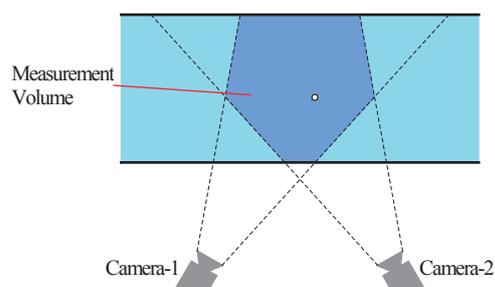


図-8 カメラ配置図と測定範囲

水路内に発生した乱れを把握するために水路中央部においてADVを用いて流速の鉛直分布の測定を行った。図-9に各水路床勾配における鉛直方向乱れ強度の鉛直分布を示す。ADVはプローブから5cmの位置にサンプリングボリュームがあるため、水面から約5cmの範囲は計測することが出来ない。水路床勾配1/1000では底面から1.0~10.0cm、水路床勾配1/500では底面から1.0~8.0cmの範囲で0.2cm毎に計測した。水路内では鉛直方向に乱れ強度などが変化していることから、本研究では流速や粒子速度のデータを鉛直方向に1cmの層に分割して結果の

整理を行った。各条件・各粒子ごとに約 40 回の粒子追跡実験を繰り返した結果、各層で得られた粒子速度データ数は約 300 であった。約 300 の粒子の鉛直速度を相加平均して粒子の平均鉛直速度とした。

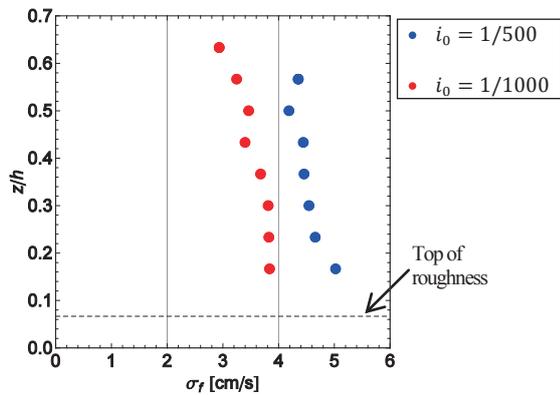


図-9 鉛直方向乱れ強度の鉛直分布

上述したように、開水路では ADV による流速の固定計測を行っており、流速のオイラー速度を計測している。図-10 に各測定点における鉛直方向流速のエネルギースペクトルを示す。この結果からコルモゴロフの $-5/3$ 乗則に従う慣性小領域が存在しており、水路内の乱流は十分に発達していることがわかる。表-3 に各測定点における水路内の乱れ特性量を示す。テイラーの時間スケール τ_λ とテイラーのマイクロスケール l_λ は乱流水槽実験と同様に式(5)と(6)から求めた。ただし、ADV で測定できなかった水面付近の乱流パラメーターは、指数関数¹¹⁾を当てはめて外挿により求めたものである。

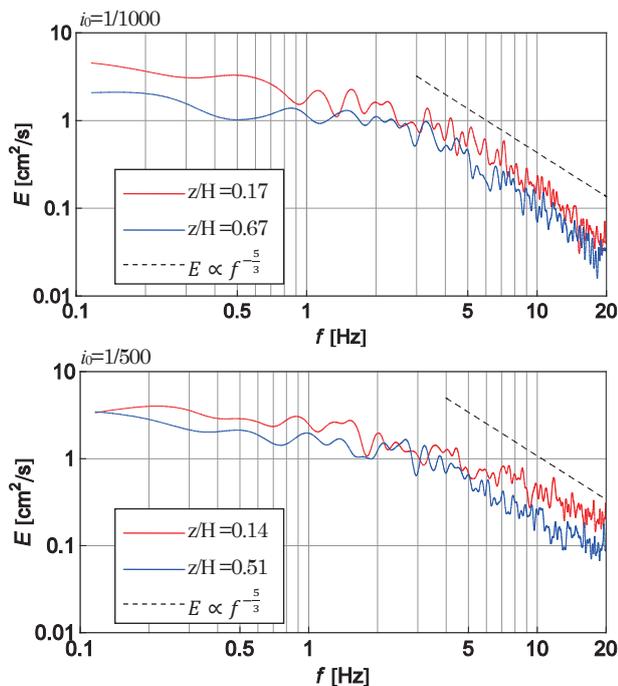


図-10 鉛直方向流速のエネルギースペクトル

開水路実験では 2 次流の影響がしばしば問題となる。開

水路の 2 次流の影響は水路のアスペクト比 $\alpha = B/h$ が大きく関係している。Nezu & Nakagawa¹¹⁾によると限界アスペクト比 α_c が存在し、 $\alpha \leq \alpha_c$ となると 2 次流の影響が強くなる。限界アスペクト比はおおよそ 5 であると言われている。本実験におけるアスペクト比は、5.33 であり限界アスペクト比とほぼ等しいため 2 次流の影響がある程度あることが考えられるが、ADV で測定された流速の鉛直分布を調べたところ、粒子が通過している範囲にはほとんど鉛直方向の平均流速は存在していなかったことから、2 次流の影響は無視することが出来ると判断した。

表-3 開水路流の乱れ特性量

i_0	Height of layer [cm]	Turbulence intensity σ [cm/s]	Velocity variance σ^2 [cm ² /s ²]	Taylor microscale l_λ [cm]	Taylor time scale τ_λ [sec]
1/1000	2.5	3.84	14.72	1.721	0.449
	3.5	3.82	14.63	1.687	0.441
	4.5	3.81	14.54	1.479	0.388
	5.5	3.68	13.52	1.537	0.418
	6.5	3.40	11.54	1.495	0.440
	7.5	3.46	11.98	1.514	0.437
	8.5	3.25	10.54	1.450	0.447
	9.5	2.93	8.60	1.410	0.481
	10.5	2.67	7.13	1.288	0.482
	11.5	2.36	5.57	1.256	0.532
	12.5	2.01	4.05	1.191	0.592
1/500	13.5	1.63	2.65	1.143	0.702
	2.5	5.02	25.22	1.233	0.246
	3.5	4.66	21.68	1.171	0.251
	4.5	4.54	20.61	1.134	0.250
	5.5	4.46	19.86	1.225	0.275
	6.5	4.44	19.74	1.601	0.360
	7.5	4.19	17.52	1.163	0.278
	8.5	4.35	18.94	1.613	0.371
	9.5	3.33	11.09	1.052	0.316
	10.5	3.01	9.04	1.019	0.339
	11.5	2.65	7.00	0.987	0.373
12.5	2.25	5.06	0.948	0.422	
13.5	1.82	3.29	0.910	0.501	

3.3 実験粒子

乱流水槽実験で用いた粒子は、発泡ポリスチレン粒子とポリプロピレン粒子および気泡であり、粒径や比重の異なる 10 種類の粒子を用いた。粒径は 0.94~3.31 mm、比重は 0.15~1.04 の範囲である。各粒子の特性量は表-4 (a)に示す。

開水路実験では水より軽いポリプロピレン粒子と水より重いポリアミド粒子の 2 種類の粒子を用いた。各粒子の特性量は表-4 (b)に示す。

粒径 d は digital microscope で撮影して測定した。静水中の終末鉛直速度 w_0 は、乱流水槽を静水状態にし、3 次元粒子追跡システムを用いて測定した。

比重 s の算出には粒子の運動方程式から求められる以下の式を用いた。

$$w_0 |w_0| = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_D} (1-s) \quad (7)$$

抵抗係数 C_D は、 $s > 1$ である水より重い粒子と、 $s < 1$ である水より軽い粒子で区別して用いた。すなわち、水より重い粒子は土粒子などの沈降速度算出によく用いられるRubey式を用い、水より軽い粒子には粒子レイノルズ数 Re_p の適用範囲が広いSchillerの実験式を用いた。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} + 2 & \text{(Rubey)} \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & \text{(Schiller)} \end{cases}$$

表-4 各実験における粒子特性量

(a) 乱流水槽実験

Particles	Diameter d [mm]	Specific density s	Terminal velocity w_0 [cm/s]	Particle Reynolds number Re_p
P0	1.10	1.01	-0.54	6
P1	1.00	0.96	1.20	11
P2	0.94	0.74	4.30	40
P3	0.98	0.98	0.77	7
P4	1.08	0.75	4.89	52
P5	1.25	0.56	8.08	100
P6	1.24	0.57	7.98	98
P7	1.02	1.04	-1.29	13
P8	3.31	0.90	7.55	248
p9	2.00	0.15	18.79	372
(Bubble)	3.00	0.32	23.17	688

(b) 開水路実験

Particles	Diameter d [mm]	Specific density s	Terminal velocity w_0 [cm/s]	Particle Reynolds number Re_p
PL	3.31	0.90	7.55	248
PH	1.64	1.14	-3.45	56

4. 実験結果と考察

4.1 乱流水槽実験

本研究では粒子の鉛直速度を相対鉛直速度 \overline{w}_p/w_0 で評価し、乱れの強さを相対乱流強度 σ_f/w_0 で評価している。図-11に相対鉛直速度と相対乱流強度の関係を示す。データはばらついてはいるが、相対乱流強度が比較的小さい範囲($\sigma_f/w_0 < 5$)では、粒子鉛直速度は静水中に比べて減少していることがわかる。特に、気泡は小さな相対乱流強度($\sigma_f/w_0 \approx 0.3$)でも、大きく平均鉛直速度が減少している。

反対に、相対乱流強度が比較的大きい範囲($\sigma_f/w_0 > 5$)では、相対鉛直速度は相対乱流強度と

ともに増加する傾向がみられ、乱流中の粒子の平均鉛直速度は、静水中の終末速度の最大3倍にまで達している。

中間的な相対乱流強度の範囲($1 < \sigma_f/w_0 < 5$)では、静水中の終末速度より平均鉛直速度が増加しているデータと減少しているデータがある。このことは、粒子の平均鉛直速度に対して、相対乱流強度以外のパラメータの影響があることを示唆している。

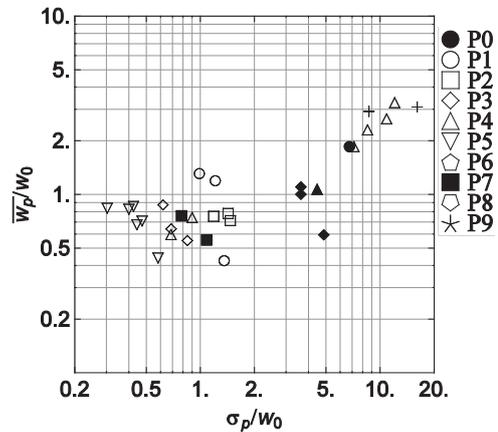


図-11 相対乱流強度と相対鉛直速度の関係

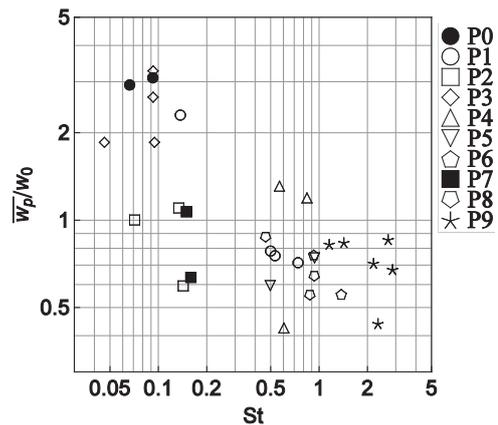


図-12 Stokes数と相対鉛直速度の関係

そこで流れに対する粒子の追従性を示す指標であるストークス数の影響を評価した。ストークス数 St は粒子の時間スケールと乱れの時間スケールの比 τ_p/τ_λ で表される。図-12にストークス数と相対鉛直速度の関係を示す。ストークス数の増加とともに相対鉛直速度が減少する傾向が認められる。

川西ら⁸⁾はMaxey⁹⁾のcellular flowを用いて、相対乱流強度やストークス数の違いによる、気泡と油滴の分布と運動軌跡の変化を調べ、本研究と同様な結果を得ている。川西ら⁸⁾は数値シミュレーション結果から、相対乱流強度が大きくない範囲で、ストークス数が大きな場合には、“vortex trapping”により粒子の相対鉛直速度が減少すること、相対乱流強度が強い範囲では“trajectory biasing”によって相対鉛直速度が増加することを示している。

したがって、本実験で得られた粒子の相対鉛直速度の変化は、“vortex trapping”と“trajectory biasing”の2つのメカ

ニズムによって引き起こされていると考えられる。

4.2 開水路実験

図-13に開水路実験における相対乱流強度と相対鉛直速度の関係を示す。水より重いPH粒子の結果に関しては、乱流水槽と同様に相対乱流強度が大きくなるにしたがって、乱流中の粒子の相対鉛直速度は減少から増加へと転じているのがわかる。乱流水槽では $\sigma_f/w_0 \approx 3.8$ で相対鉛直速度 \bar{w}_p/w_0 が減少から増加へと転じる結果が得られ、また、Kawanisi & Shiozaki⁹⁾の開水路における水より重い粒子を用いた粒子のオイラー速度計測実験結果では、 $\sigma_p/w_0 \approx 1\sim 4$ で相対鉛直速度 \bar{w}_p/w_0 が減少から増加へと転じている。これらの結果に対して本開水路実験では、より小さな相対乱流強度 $\sigma_f/w_0 \approx 0.7$ で相対鉛直速度 \bar{w}_p/w_0 が減少から増加へと転じている。

水より軽いPL粒子の結果では、相対乱流強度 σ_f/w_0 の増加とともに相対鉛直速度が減少しており、本実験条件の範囲では相対鉛直速度が増加へと転じることはない。

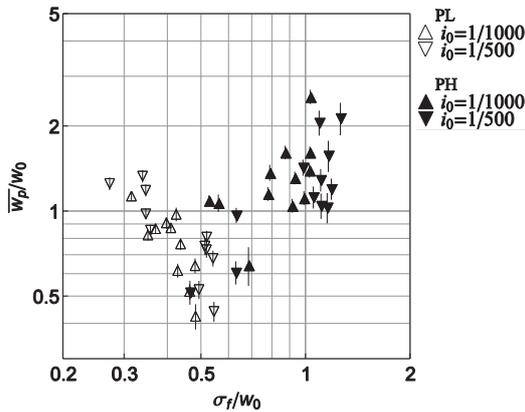


図-13 相対乱流強度と相対鉛直速度の関係

図-14に相対水深と相対鉛直速度の関係を示す。水より重い粒子の相対鉛直速度は、水路床に向かって増加しており、平均沈降速度は下層では静水中のものより大きく、上層では静水中のものより小さくなっている。反対に、水より軽い粒子は下層で平均上昇速度が静水中の値より減少し、上層では静水中よりやや増加している。

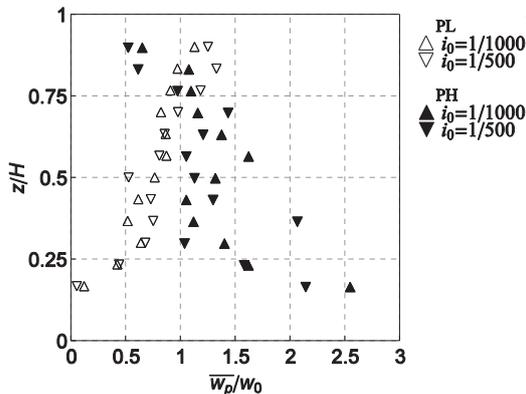


図-14 相対水深と相対鉛直速度の関係

粒子が乱流渦に対してどのような経路を通るか検討するため流速の四象限解析を行った。図-15(a)に四象限分類法を示す。

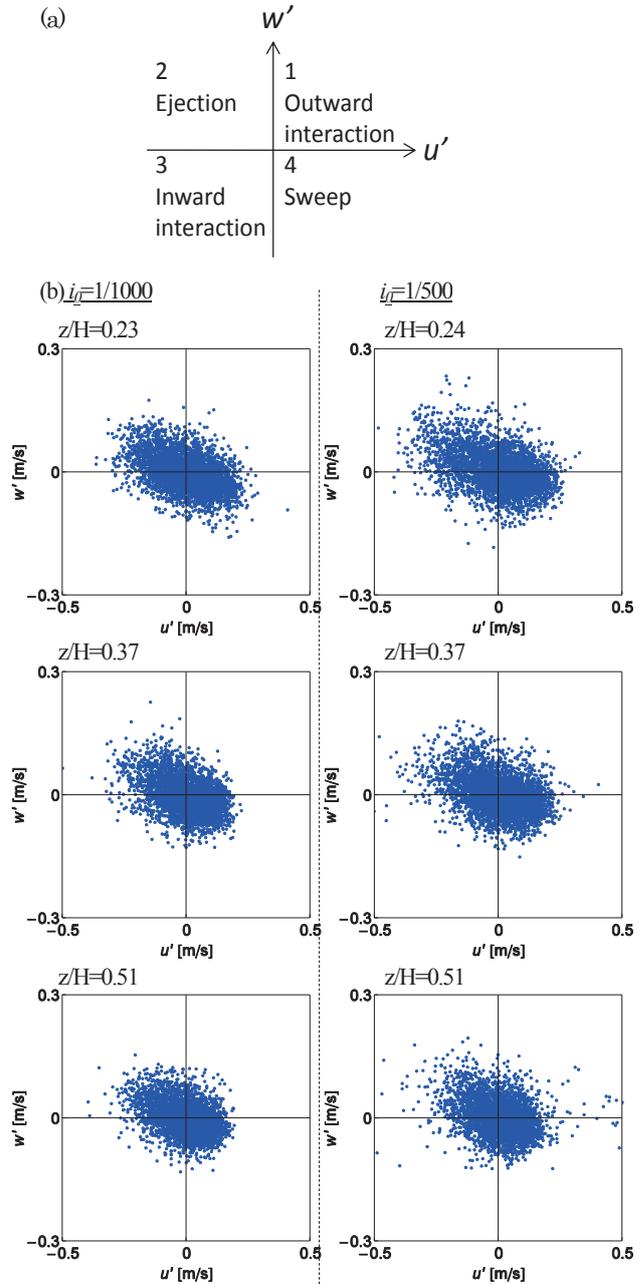


図-15 四象限解析

(a) 四象限分類法

(b) 流速の四象限解析結果

表-5 流速の四象限解析結果: 各象限の存在割合

i_0	z/H	1	2	3	4
		Outward interaction	Ejection	Inward interaction	Sweep
1/1000	0.23	16.1%	31.2%	17.3%	35.4%
	0.37	16.0%	28.8%	17.2%	38.0%
	0.51	18.1%	27.1%	15.9%	38.9%
1/500	0.24	18.6%	29.2%	16.6%	35.6%
	0.37	18.7%	28.7%	18.1%	34.5%
	0.51	20.5%	28.3%	19.0%	32.2%

図-15 (b)に四象限解析結果, 表-5に各象限の存在割合を示す. 開水路下層での流れ場は主にレイノルズ応力に寄与する ejection と sweep が卓越しており, 存在割合すなわち持続時間は, 高速下降流領域である sweep が最も長い.

図-16に粒子速度の四象限解析結果, 表-6に各象限の存在割合を示す. 流速と同様, 粒子速度においても sweep の持続時間が最も長い. これらのことから下層でのPHの鉛直速度の増加傾向とPLの鉛直速度の減少傾向が sweep により強化されていると考えられる.

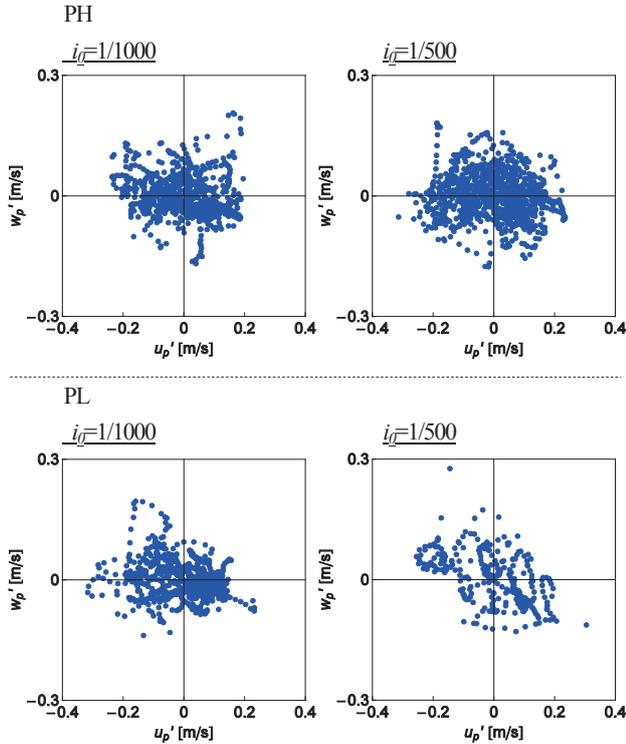


図-16 粒子速度の四象限解析結果
($z/H = 0.13 \sim 0.53$)

表-6 粒子速度の四象限解析結果: 各象限の存在割合

Particles	z/H	i_0	1 Outward interaction	2 Ejection	3 Inward interaction	4 Sweep
PH	0.13-0.53	1/1000	20.5 %	23.2 %	23.6 %	32.8 %
		1/500	23.4 %	25.5 %	21.1 %	30.0 %
PL	0.13-0.53	1/1000	22.0 %	27.0 %	16.8 %	34.2 %
		1/500	14.8 %	35.6 %	11.7 %	37.9 %

LES で発生させた開水路乱流場における粒子挙動を解析した関根¹²⁾の結果によれば, 平均沈降速度の増加は2~3%にすぎないが, これは数値実験が相対乱流強度が小さな範囲 ($u_* / w_0 = 1.3 \sim 2.1$) に限られているためだと考えられる.

4.3 粒子速度分散

図-17に流速分散と粒子速度分散の関係を示す. 図中の赤破線は, $\sigma_p^2 = \sigma_f^2$ である. 当然ではあるが, 粒子速度分散は流速分散に依存し, 正の相関がある. Snyder & Lumley¹³⁾によると, 粒子速度分散はオイラー流速分散よ

り小さくなり, 以下の関係が成り立つとされている.

$$\sigma_{particle}^2 = 0.6 \sigma_{fluid}^2 \quad (8)$$

しかしながら, 図-17に示すように, 本実験における粒子速度分散は, 流速分散より大きく, 流速分散と粒子速度分散には以下の関係が認められる.

$$\sigma_p^2 = 1.59 \sigma_f^2 \quad (9)$$

このように, Snyder & Lumley¹³⁾による研究とは異なる結果が得られたが, これは, 実験に用いた粒子の粒径の違いによるものと考えられる. Snyder & Lumley¹³⁾は粒径が 46.5 ~ 87.0 μm の粒子を用いており, 本実験では, 粒径が 1.64, 3.31 mm と Snyder & Lumley¹³⁾のものより格段に大きいものを用いている. そのため, 粒子の背後に出来る後流渦の影響により, 粒子速度分散が大きくなったと考えられる.

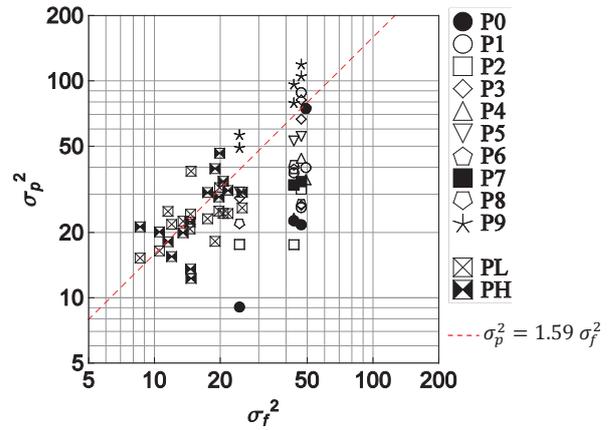


図-17 流速分散と粒子速度分散の関係

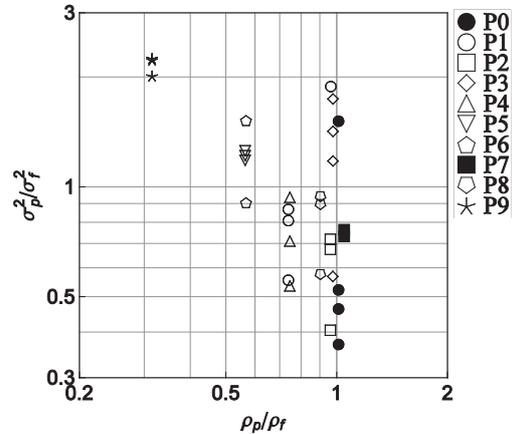


図-18 比重と相対分散の関係

(乱流水槽実験における結果)

図-18 に乱流水槽実験における粒子の比重と相対分散の関係を示す. 比重が大きくなるにしたがって, 乱流中における粒子速度分散が小さくなる傾向がみられる.

5. 結論

本研究では, 乱流水槽と開水路を用いて浮遊粒子の鉛直速度に対する乱流の影響を検討した. 以下に主要な結論を示す.

一様等方性乱流に近い乱れを発生させることのできる

乱流水槽による実験では、粒子の平均鉛直速度は相対乱流強度とストークス数により変化した。すなわち、相対乱流強度が約5より大きな領域では、相対鉛直速度は相対乱流強度とともに増加した。相対乱流強度が小さな領域では、ストークス数が大きな場合、粒子の相対鉛直速度は1より小さくなり、乱流により粒子の平均鉛直速度は静水中の値より減少した。ストークス数が小さな場合には逆に、乱流により粒子の平均鉛直速度は静水中に比べ増加した。こうした結果は、粒子の平均鉛直速度を変化させるメカニズムである、“vortex trapping”と“trajectory biasing”のどちらが支配的になるかによって引き起こされている。

壁乱流を発生させることのできる開水路による実験では、水より重い粒子は乱流強度が大きい時、粒子の平均鉛直速度が静水中の値より増加し、乱流強度が小さい時、粒子の平均鉛直速度は静水中より減少した。一方、水より軽い粒子の平均鉛直速度は、乱流強度が大きくなるとともに減少した。この結果は前述した2つのメカニズムに加え、開水路の流れ構造が影響しており、高速下降領域であるsweepが卓越していることによりPHでは沈降速度が増加し、PLでは上昇速度が減少すると考えられる。

Snyder & Lumley¹³⁾の結果と異なり、粒子速度分散はオイラー流速分散より大きくなった。これは、使用した粒子の大きさがmmのオーダーと、Snyder & Lumley¹³⁾の実験粒子より大きいことが原因したと考えられる。さらに、粒子速度の分散は粒子の比重に依存しており、比重が大きくなるのにしたがって粒子速度の分散が小さくなる傾向を示した。

本論文では相対乱流強度とストークス数の影響を調べたが、今後は、式(1)中の他の無次元量の影響についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) Murray, S. P.: Settling Velocities and Vertical Diffusion of Particles in Turbulent Water, *J. Geophys. Res.*, Vol.75(9), pp. 1647-1654, 1970.
- 2) Tooby, P. F., Gerald, L. W. and John D. I.: The Motion of a

Small Sphere in a Rotating Velocity Field: A Possible Mechanism for Suspending Particles in Turbulence, *J. Geophys. Res.*, Vol. 82(15), pp. 2096-2100, 1977.

- 3) Nielsen, P.: Turbulence Effects on the Settling of Suspended Particles, *J. Sediment. Petrol.*, Vol. 63(5), pp. 835-838, 1993.
- 4) Jobson, H. E., and Sayre, W. W.: Vertical transfer in open channel flow, *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 96(HY3), pp. 703-724. 1970.
- 5) Kawanisi, K. and Shiozaki, R.: Turbulent Effects on the Settling Velocity of Suspended Sediment, *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 134(2), pp. 261-266. 2008.
- 6) Yan, J., Cheng, N.-S., Tang, H.-W., Tan, S. K.: Oscillating-grid turbulence and its applications: a review, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 45(1), pp. 26-32, 2007.
- 7) Friedman, P. D., and Katz, J.: Mean rise rate of droplets in isotropic turbulence, *Phys. Fluids*, Vol.14(9), pp.3059-3073, 2002.
- 8) 川西澄, 塩崎遼平, 榎田哲也, 横山智弥: 乱流場における浮上粒子の上昇速度に関する研究. 海岸工学論文集, 54, pp.396-400, 2007.
- 9) Maxey, M. R.: On the advection of spherical and non-spherical particles in a non uniform flow, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 333, pp. 289-307, 1990.
- 10) Shapiro, R.: Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography, *Res. Quart.* Vol. 49, pp. 197-205, 1978.
- 11) Nezu, I., Nakagawa, H.: Turbulence in open-channel flows, IAHR monograph series, 1993.
- 12) 関根 正人: 土砂の運動解析を基礎とした浮遊砂の分散過程に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. 63(4), pp. 311-322, 2007.
- 13) Snyder, W. H., Lumley, J. L.: Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, part 1, pp. 41-71, 1971.

(2010年3月9日 受付)