

## 固体粒子移動時における流体の運動特性

立命館大学大学院 学生員  
立命館大学理工学部 正会員

高島史揚\*  
J.C.Wells

関西大学工学部  
立命館大学理工学部 正会員  
立命館大学理工学部 正会員

山本恭史\*\*  
江頭進治  
中川博次

**1.はじめに** 可視化法による実験的研究により乱流境界層内の縦渦は ejection と sweep とからなる一連の運動<sup>1)</sup>からなることが知られている。この運動により乱れが発生し、底面付近の運動量輸送に重要な役割を担っていると考えられている。近年河川環境を意識して、多自然型川づくりが行われつつあり、護岸材料に自然石などが用いられている。ところが、それらの材料に作用する流体力の評価が未だ十分ではなく、たとえば粒子初動時の粒子と流れの相互作用が重要な要素と考えられる。本研究では、PIV(Particle Image Velocimetry)手法を用いて底面付近の運動量輸送が粒子初動時に与える影響を検討する。

**2.実験方法と実験条件** 図-1 は実験装置の概略図である。本研究は流れに垂直な断面において PIV(Particle Image Velocimetry)を用い、速度計測を行った。実験では長さ 8m、幅 50cm、高さ 40cm の水平直線水路を用い、路床は、滑面とした。測定は上流端から 5.5m の断面で行い、測定面には厚さ約 4mm のシート状のレーザー光を照射した。測定面から 50cm 下流側の位置に 45 度の傾きを持って設置された鏡をガラス板を通して、水路上部に設置された CCD デジタルカメラ (Kodak, ES1.0, 1008 × 1016pix, with Nikkor105mm microlens) により測定面の撮影を行った。

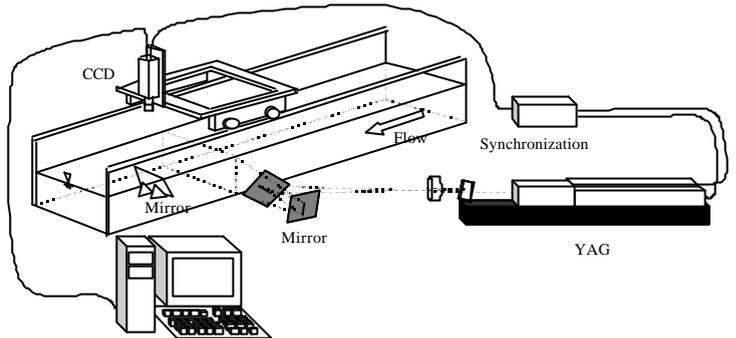


図-1 PIV 実験装置概略図

流れのトレーサー粒子は、平均径 10 μm の中空ガラスビーズ (Potters Industries) を使用し、水路上流端にあるタンクで攪拌して注入した。撮影は、 $Dt$  秒間隔の 2 枚 1 組の連続画像を粒子の初動時前後最大 23 秒間行った。今回の実験では  $Dt=5ms$  とした。速度成分は相互相関法によって計算し、相関値のピーク近傍の 3 点でガウス分布を仮定することによりサブピクセル精度で求めた。表-1 は実験条件である。ここに、 $d$  は粒子の直径、 $w_f$  は粒子の沈降速度、 $Q$  は流量、 $h$  は水深、 $U$  は平均流速、 $U^*$  は摩擦速度、 $T$  は水温、 $Re=Uh/\nu$ 、 $Re^*=U^*h/\nu$  である。 $U^*$  は Blasius 則より求めた。実験条件の設定は、Blasius 則で算定した摩擦速度に基づくレイノルズ数を 300 とするよう

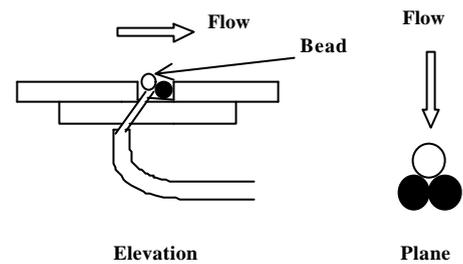


図-2 粒子設置図

に決定した。粒子には、直径が 4mm ( $d^+=12.8$ ) のものと 11mm ( $d^+=35.3$ ) のものを使用した。ここに、 $d^+=dU^*/\nu$  である。以下、粒子を 4mm 粒子、11mm 粒子と呼ぶことにする。図-2 は粒子の設置方法である。粒子の設置は、それぞれ同粒径の粒子を用い、粒子が左右に揺れないような接触状態になるようにした。滑面を維持するために可動粒子以外は滑面にはめ込み隙間をパテで埋めた。

表-1 実験条件

	$d$ (mm)	$w_f$ (cm/s)	$h$ (cm)	$Q$ (ℓ/s)	$T$ (°C)	$U$ (cm/s)	$Re$	$U^*$ (cm/s)	$Re^* (=U^*h/\nu)$
case1	4	2.79	10.0	3.54	9	7.08	5246	0.406	300
case2	4	2.52	10.0	3.25	12	6.50	5243	0.373	300
case3	4	2.61	10.0	3.34	11	6.68	5246	0.383	300
case4	11	2.50	10.0	3.42	10	6.84	5233	0.392	300
case5	11	2.33	10.0	3.34	11	6.68	5246	0.383	300
case6	11	1.93	10.0	3.16	13	6.32	5240	0.362	300

**3. 粒子運動と縦渦の関係** 実験は粒子の静止状態から移動するまでの一連の運動について行った。粒子の運動は Saltation が多かった。以下、粒子が静止状態から初めて動き出す瞬間を粒子の初動とし、解析は初動時に着目して行った。図-2、図-3 には実験により得られた速度から主流方向渦度を計算し、テイラーの凍結乱流の仮説により断面平均流速を用いて時系列のデータを 3 次元的に並べたものを示す。流れは左から右である。渦度は  $\pm 0.25u_*^2/n$  の等値面で表されており、灰色が時計回り (正)、黒色が反時計回り (負) の渦度を示す。図の中央が粒子初動時に相当し、初動時の前後  $t=2\sim 3$  秒を示している。4mm 粒子初動時の代表的な渦度パターンは、図-2 に示されているような、粒子の左右に相反する回転を持つ渦が存在するものである。一方、11mm 粒子は図-3 に示すように底面付近において縦渦が見られなかった。これらの図より粒子の初動時には必ずしも縦渦が存在するとは限らないようである。図-4 には初動時の  $y^+=30$  における  $y$  方向の速度を沈降速度で除した値と接触角を示す。粒子初動時には、負の速度が多く見られる。4mm 粒子は接触角が大きくな

Key words : PIV, vorticity, longitudinal vortex, sweep, ejection

\* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL. 077-561-2732 FAX 077-561-2667

\*\* 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL. 06-6368-1121

るにつれ初動時の速度が小さくなっていることが見て取れる。11mm 粒子においては接触角による影響は4mm 粒子に比べ小さい。以上より4mm 粒子の場合は底面付近の縦渦が存在するときに動き出し、接触角による影響も見られる。11mm 粒子の場合には縦渦がなく、接触角とは無関係に動き出している。これよりsweep による高速流体の輸送によって粒子の運動が生じているものの、その輸送は必ずしも底面付近の縦渦による物質輸送によるものではないことが推察される。

**4. 粒子初動時の渦構造** 図-5、図-6(a)および図-6(b)は粒子初動時の水平面内の速度場を示すものである。ただし、図-5 に示している速度ベクトルはその高さにおける平均流速を引いた、変動成分のみを示している。図-2、および図-5 より、4mm 粒子においては粒子周辺に平均流速より速い流れがあり、少し離れた位置には逆に平均流速より遅い流れが存在することがわかる。これは、底面付近においての縦渦による sweep と ejection の一連の運動と考えられる。一方、11mm 粒子においては、図-6(a)のように粒子周辺が平均流速より小さい時と、図-6(b)のようにかなり広範囲で平均流速より速い流れが発生するときに粒子が動き出しているようである。図-6(a) (b)および図-3 より11mm 粒子においては底面付近の縦渦による作用ではなく、むしろ、それよりもスケールの大きな流れの影響していると考えられる。つまり、粒子の初動において底面付近の縦渦運動のみが支配的ではなく、更に上方に存在する高速流体の sweep も影響するものと推察される。

**5. おわりに** 粒子初動時の速度と、渦度を測定することにより、粒子と流れの相互作用を検討した。その結果、粒子初動時において、必ずしも底面付近の縦渦が影響するものではない。4mm 粒子については、底面付近の縦渦の sweep による影響が推察され、11mm 粒子については、高速流体の影響が推察される。

本研究は、一部、文部省学術フロンティア、および同省科学研究費基盤研究C(代表者:J. C. Wells)の補助を受けて進めているものである。ここに記して感謝します。

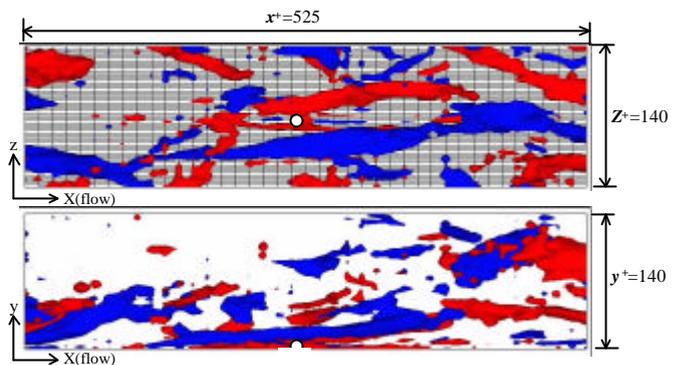


図-2 渦度 $0.25 u.^2 /$  の等値面(4mm 粒子)

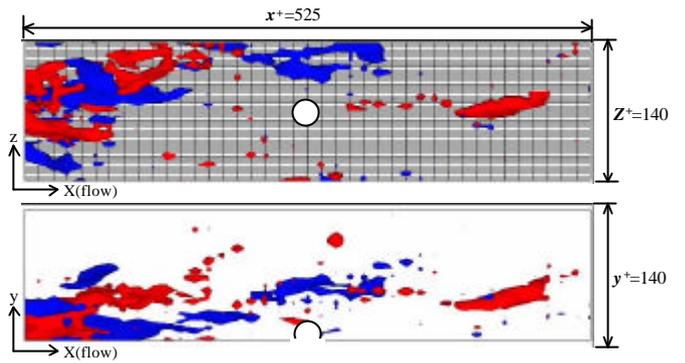


図-3 渦度 $0.25 u.^2 /$  の等値面(11mm 粒子)

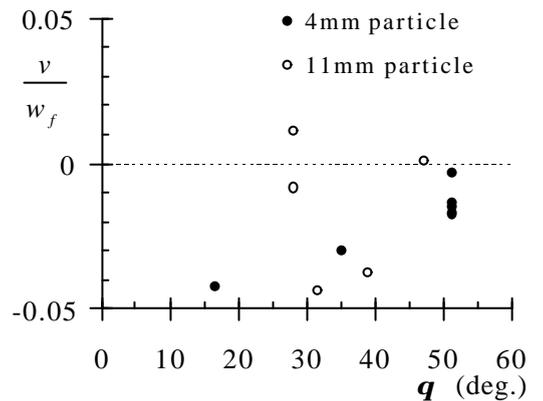


図-4 初動時の接触角とy方向の流速

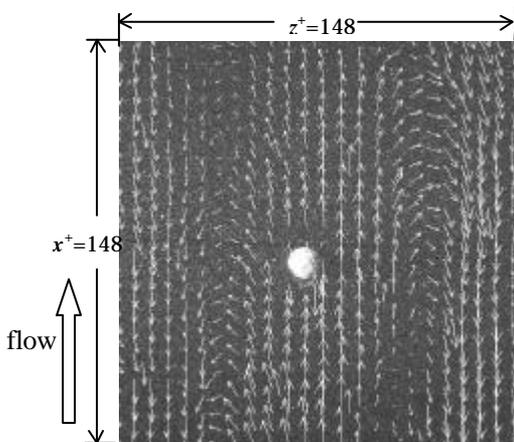


図-5 4mm 粒子初動時の $y^+=8$  水平面内のベクトル乱れ成分

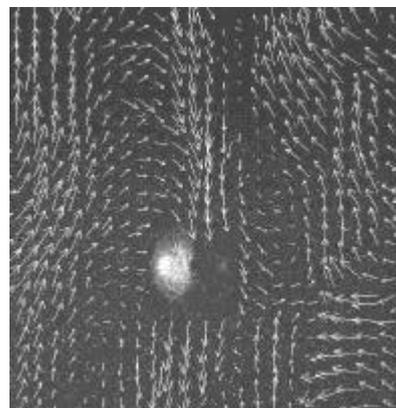


図-6(a) 11mm 粒子初動時の $y^+=16$  水平面内のベクトル乱れ成分

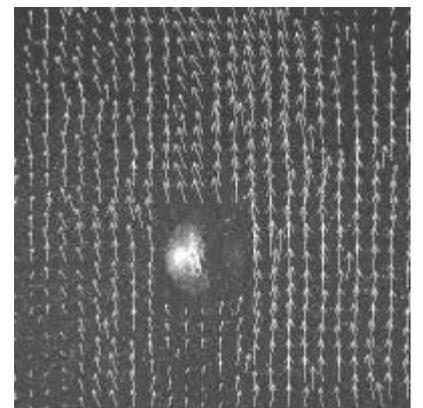


図-6(b) 11mm 粒子初動時の $y^+=16$  水平面内のベクトル乱れ成分

**参考文献** 1) 玉井信行・禰津家久・小松利光・大成博文・大橋正和・浅枝隆:乱流における組織構造の役割, 土木学会論文集, 第423号 / -14, pp.25-41, 1990. 2)