

立命館大学大学院
立命館大学理工学部
立命館大学理工学部
立命館大学理工学部

学生員 ○ 高島史揚
正会員 J.C. Wells
正会員 江頭進治
正会員 中川博次

1.はじめに 可視化法による実験的研究によれば、乱流境界層内の縦渦は底面付近の流体が巻き上げられ、剥離する現象であると見なされている。この現象は、burst 運動とも呼ばれ、ejection と sweep とからなる一連の運動¹⁾である。burst 運動により乱れが発生し、それは底面付近の物質輸送に重要な役割を担っていると考えられている。本研究では、底面付近の物質輸送の構造を詳しく検討するための一環として、路床において粒子の動き出す瞬間に焦点を当て、可視化法を用いて粒子と渦構造との関連性を検討する。

2. 実験方法と実験条件 図1は実験装置の概略図である。実験では長さ8m、幅50cm、高さ40cmの変勾配循環式直線水路を用いた。路床は、11mm($k^+=35.3$)のガラスビーズを密に敷き詰めて粗面にされている。流れのトレーサとして、フルオレセイン(比重1.005)を使用した。これをマイクロチューブを通して水路底面下方に設置したタンクに送り、そこから幅1mm、長さ25cmのスリットから一様に流出させた。ライトシートは、スライドプロジェクターを用いて、薄くて均一な厚さ3mmのものとし、路床と60度の角度を保つように構成した。水路側面に8mmビデオカメラを設置し、鏡を用いてライトシートの断面と側面を同時に撮影した。表1は実験条件である。

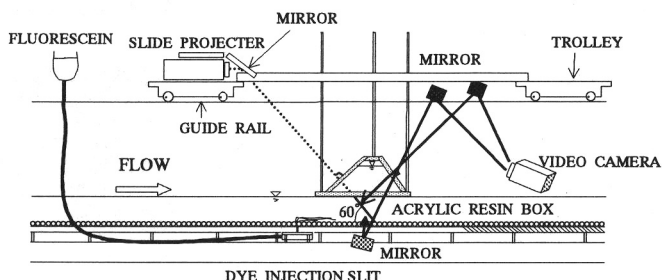


図1 実験装置

表1 実験条件

	d (mm)	w_f (cm/s)	H (cm)	Q (cm ³ /s)	U (cm/s)	U_* (cm/s)	T (°C)	Re	$Re_* (=Uh/\nu)$
case1	4	1.67	10.79	2730	5.06	0.43	9	4050	346
case2	11	1.78	10.79	2730	5.06	0.43	9	4050	346

ここに、 d はトレーサ粒子の直径、 w_f はトレーサ粒子の沈降速度、 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_* は完全粗面の対数則より求めた。トレーサ粒子には、直径が4mm($d^+=12.8$)のものと11mm($d^+=35.3$)のものをを使用した。以下、トレーサ粒子を4mm粒子、11mm粒子と呼ぶことにする。4mm粒子は粗面上に直接置き、11mm粒子は粗面を構成しているビーズを取り除き、そこにはめ込んだ。但し、後者における設置高は、トレーサ粒子(11mm粒子)が、10秒程度で飛び出すように調整されている。実験は、トレーサ粒子を設置してから飛び出すまでを1回とし、十数回繰り返した。

3. 渦とトレーサ粒子の挙動 実験において、4mm粒子はrolling、11mm粒子はsaltationの挙動を示した。トレーサ粒子は静止状態から前後に揺れ始め、揺れが大きくなった後、河床から飛び出した。ここで、静止しているトレーサ粒子が前後に揺れ始める瞬間を動き出す瞬間、河床から離れる瞬間を飛び出す瞬間と呼ぶことにする。写真1は4mm粒子の動き出す瞬間における映像である。4mm粒子の動き出す瞬間には、粒子の左右にそれぞれ減衰しつつある小さい渦と、粒子直径に比べ比較的大きい発達過程にある渦が存在するパターンが多く見られた。また、写真1に記した矢印の先端付近は、縦渦による高速流体の存在を想定したものである。これはburst運動における縦渦のsweep現象と考えられているものであり、この流体力で粒子が移動するものと推察される。写真2は、11mm粒子の動き出す瞬間の映像である。11mm粒子の動き出す瞬間には、発達した大きな縦渦が存在する場合も見うけられたが、ほとんどの場合、写真2のように粒子の周りにstreak(低速縞)や縦渦は見られなかった。しかし、粒子から遠く離れた位置には、streakや縦渦が見られた。これには、次のような原因が推察される。1つは、河床付近の縦渦よりも大きいスケールの縦渦が流体を輸送することにより生じる流体力の影響、もう1つは、外層($y^+ > 70$)に存在するという横渦の強い

写真1 4mm粒子の動き出す瞬間
(流れの向きは写真奥から手前)写真2 11mm粒子の動き出す瞬間
(流れの向きは写真奥から手前)写真3 11mm粒子の飛び出す瞬間
(流れの向きは写真奥から手前)

Fumiaki TAKASHIMA, John.C.WELLS, Shinji EGASHIRA and Hiroji NAKAGAWA

sweep 現象による shear layer の影響である。

写真 3 は写真 2 に示す粒子の飛び出す瞬間の映像である。飛び出す瞬間には粒子の近くに縦渦が見られ、縦渦から流体力を受けて動いていると推察できる。

以上より、トレーサー粒子の移動に影響を及ぼす力は、規模に違いは見られるが、sweep によるものと考えられる。

4. 粒子運動と渦の関係 図 2 は、実験の解析に用いるパラメータを模式的に示している。ここに、 D は渦の直径、 h は渦の鉛直高さ、 t は粒子が動き出してから飛び出すまでの時間、 θ は渦の傾きで、時計回りを正、 l は粒子から一番近い渦の端までの距離、 s は粒子から streak までの距離であり、左右とも粒子から遠ざかる方を正とした。これらは、摩擦速度と動粘性係数により、次のように無次元化されている。 $D^+ = D \times U_* / \nu$ 、 $h^+ = h \times U_* / \nu$ 、 $t^+ = t \times U_*^2 / \nu$ 、 $l^+ = l \times U_* / \nu$ 、 $s^+ = s \times U_* / \nu$ 。なお、粒子の運動には、一番近い渦の影響が大きいと考え、左右の渦対において粒子側の 2 つの渦を測定した。つまり、粒子の左側に位置する渦対であれば、その渦対の右渦を、粒子の右側に位置する渦対であれば、その渦対の左渦の諸量を測定した。

表 2 は、十数回実験を繰り返して得たデータにおいて、粒子が動き出す瞬間のみの諸量を測定した結果である。粒子の動き出す瞬間には、渦や streak はトレーサー粒子の左右に必ずしも同時に存在しない。そのため、各パラメータのデータ総数が異なっている。表 2 によると、渦の直径及び高さは、それぞれ $D^+ = 30$ 、 $h^+ = 65$ 程度である。粒子の飛び出すまでの時間において、11mm 粒子の飛び出す時間は 4mm 粒子のものの約 2 倍となっている。この結果によると、11mm 粒子の運動に影響を与える渦構造は、4mm 粒子の運動に影響を与える渦構造に比べ、長時間流体力を与えるものである。因みに、その構造は主流方向に対して長い構造である。

図 3 及び図 4 は、トレーサー粒子が動き出す瞬間に存在する渦の端の位置を示した図である。図 5 及び図 6 は、トレーサー粒子が動き出す瞬間に存在する streak の位置を示したものである。これらの図は、下流から上流方向を見たものであり、粒子の中心を原点とし、粒子より左右に正の軸を取っている。また、矢印の先が示す位置は、左右それぞれの平均の位置である。これらの図より 4mm 粒子に比べ 11mm 粒子の動き出す瞬間には、原点より遠く離れた位置に渦が存在している。渦の端の位置や streak の位置の標準偏差をみると、4mm 粒子に関するものが小さい。これは、4mm 粒子の運動と縦渦との関連性は 11mm 粒子の場合よりも強いことを示している。

5. おわりに 粗面上における粒子運動と渦構造との関連性を検討した。粒子運動は、規模に違いはあるが sweep によって力を受けている。また、粒子運動に影響を及ぼす渦のスケールは、粒径により異なっていることが分かった。例えば、 $D^+ = 30$ 、 $h^+ = 60$ 以下の縦渦は、4mm 粒子の運動と関連性は強い。一方、11mm 粒子の運動には $D^+ = 30$ 、 $h^+ = 60$ より大きい渦が関連している。今回の実験を通して、可視化では見えない渦が粒子運動に大きく関連している印象を強く受けた。今後、可視化法とレーザー流速計を併用した流体測定を行い、粒子運動に対する見えない部分の影響を解明していきたい。

本研究は、一部、文部省学術フロンティア、および文部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。

参考文献 1) 玉井信行・瀬津家久・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 / II-14, pp.25-41, 1990.

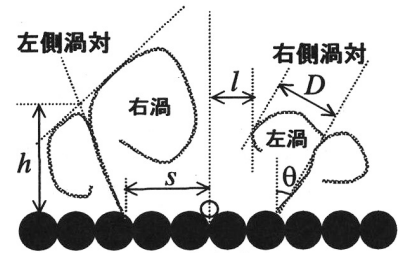


図 2 解析方法

表 2 実験結果

4mm 粒子	D^+	h^+	t^+	θ	l^+	s^+
平均	29.41	66.53	24.23	24.33	20.94	56.96
偏差 σ	16.53	25.67	6.94	23.29	20.09	20.26
データ数 N	12	12	11	12	12	12
$\sigma / \sqrt{N}$	4.77	7.41	2.09	6.72	5.80	5.85
11mm 粒子	D^+	h^+	t^+	θ	l^+	s^+
平均	33.13	62.82	40.57	3.96	33.62	69.52
偏差 σ	16.77	22.49	12.00	31.37	33.74	29.88
データ数 N	19	24	30	23	19	24
$\sigma / \sqrt{N}$	3.85	4.59	2.19	6.54	7.74	6.10

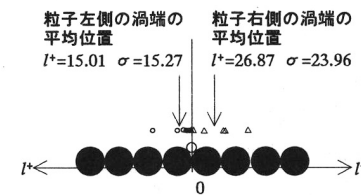


図 3 4mm 粒子の動き出す瞬間に存在する渦の端の位置

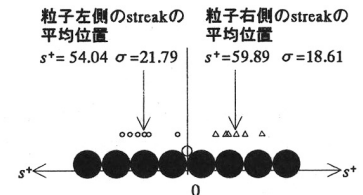


図 5 4mm 粒子の動き出す瞬間に存在する streak の位置

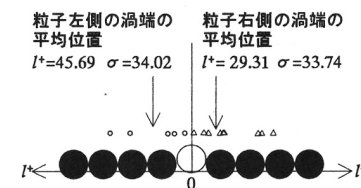


図 4 11mm 粒子の動き出す瞬間に存在する渦の端の位置

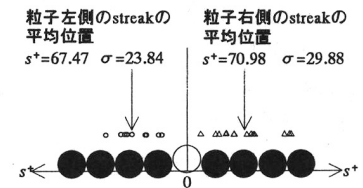


図 6 11mm 粒子の動き出す瞬間に存在する streak の位置