

京都大学	学生員	○秋本哲朗
京都大学	フェロー	棚津家久
京都大学	学生員	野口和則
京都大学	学生員	中島与博

1. はじめに

近年、浮遊砂流れにおける粒子・流体間の相互作用の重要性が指摘され、粒子・流体の two-phase 的なアプローチによる研究が活発に行われている。本研究では粒子の浮上に大きな影響を及ぼすとされる河床波流れに着目して、画像解析 D-PIV¹⁾を用いて流速の計測を行い、粒子を伴う流れと粒子を伴わない流れ(清流 clear water)で、ボイル渦の発生周期および発生頻度にどのような変化があるかについて検討した。

2. 実験手法および水理条件

実験装置および計測装置の概要を図-1 に示し、水理条件を表-1 に示す。本実験で用いた水路は、長さ 10m、幅 40cm の循環式可変勾配型直線水路である。用いた河床波模型は、波高 $h_s=2\text{cm}$ 、波長 $l_s=40\text{cm}$ の二次元河床波である。河床波の波長と水深の比は実河川のものとはほぼ一致させ、5.3:1 とした。全ケースで流量は一定とし、清流 CW を 1 ケース、浮遊砂流れ SS を 2 ケース行った(表-1)。浮遊粒子としてポリエキストラ粒子(粒径 $d_p=0.25\text{mm}$ 、比重 $\rho_p=1.2$)とガラスビーズ(粒径 $d_p=0.20\text{mm}$ 、比重 $\rho_p=2.6$)を投入した。また、流体挙動を代表するトレーサーとして、直径 0.025mm 、比重 1.02 のナイロン 12 粒子を用いた。

計測区間は水路上流端から 7m 下流の地点に設定し、浮遊粒子の投入は計測地点から上流側 2m の位置で行った。画像計測は水路上方に設置された High Speed CMOS カメラ(Dantec)によって行われ、1/40s ごとに $1280 \times 1024\text{pixel}$ の画像を時間間隔 $\Delta t=1/150\text{s}$ の画像を 2 枚ずつ記録した。撮影は、 $y/h_s=1.5, 2.5, 3.75$ の断面で行った。粒子速度算出に使用した D-PTV において、瞬間流速の算出は文献 2)と同様であるが、同時に画像中の粒子数をカウントすることにより瞬間粒子濃度の算出が可能であった。粒子濃度 C を表-1 に示した。また、ボイル渦の計測方法として、過去の研究からボイル渦領域の流下方向の流速が低速になることが知られていることから³⁾、観測する断面での平均流速に対する低速割合の形で閾値を設定し、その閾値を下回る低速領域をボイル渦と定義した。これらの閾値は各高さごとに設定され、一定領域にこの閾値を下回る低速流体塊がある程度の広がりをもって存在することを確認し、これをボイル渦として発生周期を求めた。このようなボイル渦を、全計測

表-1 水理条件表

case	B (cm)	h_s (cm)	h (cm)	l_s/h_s	U_m (cm/s)	Fr	C
CW01	40.0	2.0	7.0	20	25.0	0.30	-
SS1.2							$3.84\text{E-}05$
SS2.6							$3.88\text{E-}05$

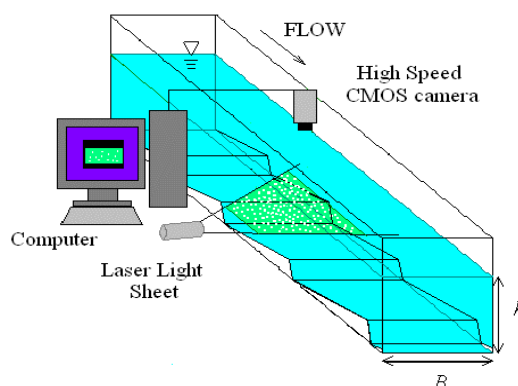


図-1 実験水路および計測装置の概要

時間 $T=52$ 秒間カウントし、平均発生周期を算出した。

3. 実験結果および考察

表-2 に清流におけるボイル渦の平均発生周期 T_{boil} と最大流速 U_{max} および水深 h で無次元化した $T_{boil}U_{max}/h$ の値を示す。これを実河川のボイル渦発生周期と比較したものが図-2 である。これにより、本実験室規模の流れにおいても河川で見られるボイル渦を観測できたものと考えられる。閾値については、各断面の平均流速の何%という表示形式とした。本来ならば、全ての水平断面位置で一定の閾値を設定するのが望ましいが、断面ごとに流速の変動値が大きく異なるため、表中のような相違する値となった。表-2 における発生頻度とその閾値設定から、ボイル渦による低速流体塊の通過頻度が、水面に近づくにつれて小さくなっていることが確認される。すなわち、ボイル渦発生直後の $y/h_s=1.5$ の水平断面位置で得られたボイル渦の発生周期が一番小さく、水面に近づくにつれて発生周期が増大する結果となり、水面まで到達せずに消えてしまうボイル渦もあったと考えられる。また、実河川におけるボイル渦は水面において観測されたものであるが、水面付近の $y/h_s=3.75$ におけるデータは $T_{boil}U_{max}/h=5.7$ となり、Jackson(1976)⁴⁾が提唱した $T_{boil}U_{max}/h=7.6$ とほぼ一致することが確認できた。

表-2 ボイル渦の発生周期(清流)

	粒子なし			
	平均流速(U_f/U_{max})	閾値	$T_{boil}(s)$	$T_{boil} \cdot U_{max}/h$
$y=3$	0.73	50.8%	0.872	3.81
$y=5$	0.81	75.1%	0.963	4.21
$y=7.5$	1.00	84.8%	1.30	5.68

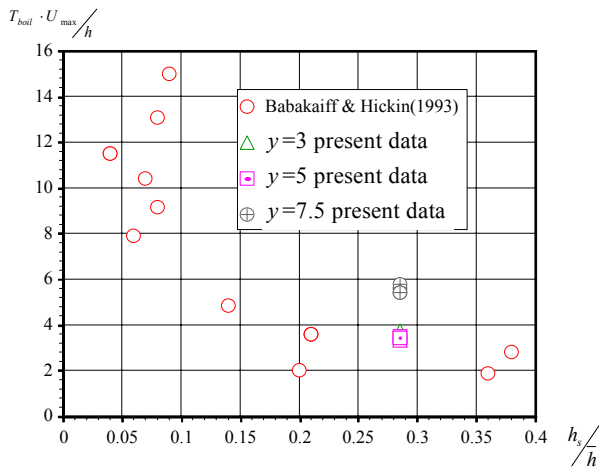


図-2 実河川とのボイル渦発生周期比較

表-3 は、清流においてボイル渦を判別した閾値を浮遊砂流れにも適用し、粒子を伴うことによりボイル渦の発生周期がどのように変化したかを検討したものである。表より、閾値を同じに設定したにもかかわらず、浮遊砂流れではボイル発生周期 T_{boil} に大きな変化が生じており、注目される。粒子を投入しないケースに比べてボイル発生周期が増加する(ボイル渦の発生頻度が減少する)結果となった。これにより、粒子の投入によってボイル渦の発生が抑制された、あるいはボイル渦の強度が小さくなったと推測される。また、表中には同時に計測された粒子濃度を示したが、粒子濃度の濃い断面高さ y では発生周期の変化が非常に大きくなっており、発生周期に及ぼす粒子濃度の影響は大きいものと考えられる。

本研究においては、ボイル渦が発生してから次のボイル渦が発生するまでの時間間隔、すなわちボイル渦の発生頻度分布についても算出し、検討を行った。図-3 はその頻度分布を高断面 y/h_s ごとに示したものであり、縦軸はボイル個数割合、横軸は発生間隔とした。なお、発生時間間隔のステップは 0.5s 刻みとし、0~0.5s に発生する確率を 0.25s、0.5~1.0s に発生する確率を 0.75s の値としてプロットした。その結果、 $y/h_s=1.5$ の断面で

表-3 ボイル渦の発生周期(浮遊砂流との比較)

	粒子なし			
	平均流速(U_f/U_{max})	閾値	$T_{boil}(s)$	粒子濃度
$y=3$	0.73	50.80%	0.872	-
$y=5$	0.81	75.10%	0.963	-
$y=7.5$	1	84.80%	1.3	-
	粒子あり($\rho=1.2$)			
	平均流速(U_f/U_{max})	閾値	$T_{boil}(s)$	粒子濃度
$y=3$	0.74	50.80%	1.535	2.13E-05
$y=5$	0.82	75.10%	1.625	1.35E-05
$y=7.5$	1	84.80%	3.095	9.16E-06
	粒子あり($\rho=2.6$)			
	平均流速(U_f/U_{max})	閾値	$T_{boil}(s)$	粒子濃度
$y=3$	0.72	50.80%	1.091	7.53E-06
$y=5$	0.82	75.10%	1.182	2.29E-06
$y=7.5$	1	84.80%	2.113	1.13E-06

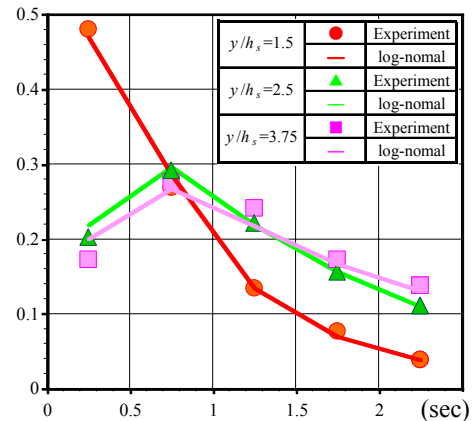


図-3 ボイル渦の発生頻度

は、非常に短い時間間隔でボイル渦が発生・通過し、頻度のピークは 0.25s 程度であると推測される。また、 $y/h_s=2.5, 3.75$ と水面に近づくにつれて、ボイル渦の発生時間間隔は徐々に長くなっていき、頻度のピークも長時間になる様子が確認できた。また、同図中に対数正規分布を実線で示した。ステップは 0.5s 刻みとした。実測値と対数正規分布は非常に良く一致し、ボイルの頻度がこれらの頻度分布は対数正規分布に従うことがわかった。

4. おわりに

本研究は、河床波流れにおけるボイル渦の発生周期とその頻度分布に着目し、実河川のボイルの発生周期と比較をした。また粒子を伴うことで発生頻度が減少することがわかった。さらに、ボイル渦の発生頻度が対数正規分布で良好に表現されることがわかった。

参考文献

- 1) 瀬津家久・野口和則・山上路生 (2006) : 河床波上の浮遊砂流れにおける粒子濃度が液相の乱流構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, vol.9, pp.951-958.
- 2) Nezu, I., and Azuma, R. (2004) : Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open-channel flows, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.130, pp.988-1001.
- 3) Babakaiff, C.S. & Hickin, E.J. (1996) : Coherent flow structures in Squamish River Estuary, British Columbia, Canada, Coherent Flow Structures(Ashworth *et al.* (eds)), Wiley, 321-342.
- 4) Jackson, R.G. (1976) : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, J.Fluid Mech., vol.77.