

転波列流れの構造に関する実験的考察

大阪産業大学工学部 正 員 宮島 昌弘
大阪産業大学大学院 学生会員 奥田 香奈恵

1. はじめに

急勾配水路を流下する転波列を伴う流れについて、その特性を把握することは、防災や環境工学的な観点から、流水そのものの流下や土砂の浸食・輸送などの機構を認識する上での基礎的な知見を得るために重要であると考えられる。本研究では、転波列流れの構造に関して次元解析の検討をまじえて実験的に考察した結果について報告する。

2. 実験方法と実験条件

実験は長さ5m、水路幅Bが20cmの亚克力性可変勾配水路を用いた。河床面は滑面と粗面 $D_{84}=1.9\text{mm}$ の2種類である。実験条件を表-1に示す。ここに、 $Fr=Uo/\sqrt{gho}$, g : 重力加速度, $Uo=Q/(Bho)$, B : 水路幅, Q : 流量, ho : 平均水深

3. 次元解析的な考察

急勾配水路上の転波列は、水深が非常に浅い状態で流れること、そしてそこに適当な流量が与えられると転波列が自動的に発生しそれらが規則的に流下していくと言える。もう少し定量的には、乱流ではフルード数が2を越えると転波列が発生するという表現になる。またドレスラー¹⁾が指摘しているように転波列の存在と摩擦抵抗とは密接な関係があると考えられる。これから無次元量である水路勾配 S と摩擦損失係数 f が重要な因子であることが想像できる。いまその他の変量も含めて転波列の諸量が平均量として乱流を対象として、周期も含めて次式で表されとする。

$$F(g, h, U, \rho, T, f, S) = 0 \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 h : 代表水深, U : 代表流速, ρ : 密度, T : 周期である。これに次元解析を施すと

$$\Phi(Fr, U/h \cdot T, f, S) = 0 \quad \text{----- (2)}$$

が得られる。この第2項の $U/h \cdot T$ についてもうすこし検討してみよう。転波列は、波動と言うより流体粒子速度と位相速度が等しいことから、非常に流動性の卓越した流れであること²⁾の認識は重要である。いま実験例Run No.2の場合、表面付近の流速が1.5 m/secである。この流れが水深3.5 mmで出現しているわけであるから、速度勾配（最大流速/水深）の非常に大きな流れであることが判る。この場合430 (1/sec)である。つまり転波列流れの特徴の1つは大きな速度勾配をもつ流れであり、実験条件全体の転波列の周期が0.1-0.5秒程度であることを考えると、この第2項の無次元量は速度勾配の無次元化を表していると考えられる。

表-1 実験条件

Run No.	水路勾配S	平均水深 ho(mm)	フルード 数Fr	水路の 粗滑
1	1/5.97	2.5	6.5	滑面
2	1/5.97	3.5	7.2	滑面
3	1/5.97	4.4	7.6	滑面
4	1/8.25	3.1	6.0	滑面
5	1/8.25	4.2	6.5	滑面
6	1/8.25	4.7	6.7	滑面
7	1/12.7	4.0	4.6	滑面
8	1/12.7	4.7	4.7	滑面
9	1/12.7	5.1	5.2	滑面
10	1/5.86	4.8	2.8	粗面
11	1/5.86	5.6	3.1	粗面
12	1/5.86	6.1	3.4	粗面
13	1/5.86	6.9	3.7	粗面
14	1/7.67	4.9	3.2	粗面
15	1/7.67	5.4	3.4	粗面
16	1/7.67	6.1	3.3	粗面
17	1/7.67	6.9	3.6	粗面
18	1/9.79	6.8	2.3	粗面
19	1/9.79	7.6	2.6	粗面
20	1/9.79	8.8	2.6	粗面
21	1/5.90	2.9	5.6	粗面
22	1/5.90	4.1	4.6	粗面
23	1/5.90	5.3	3.9	粗面
24	1/5.90	6.7	3.5	粗面
25	1/6.90	4.8	5.0	粗面
26	1/6.90	5.6	4.8	粗面

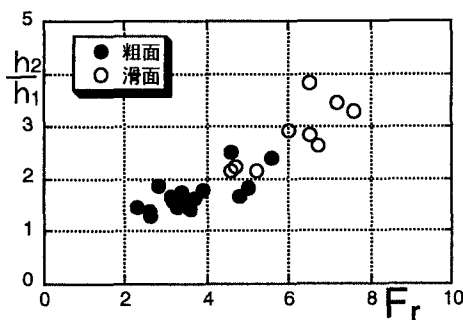


図-1 転波列フロント水深比とフルード数

急勾配水路、薄層流、転波列

〒574 大阪府大東市中垣内3-1-1 TEL.0720-75-3001. FAX. 0720-75-5044

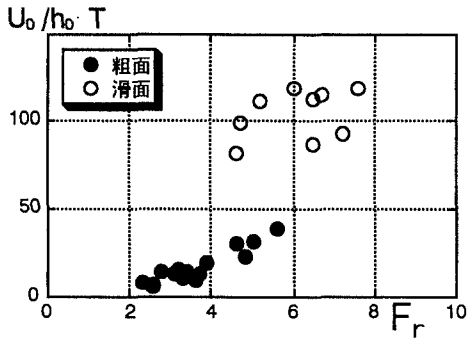


図-2 フルード数と無次元速度勾配

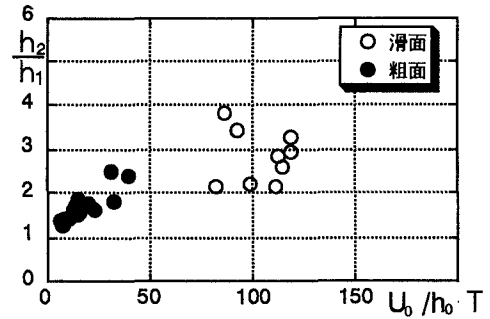


図-3 フロント水深比と無次元速度勾配

4. 転波列のフロントとフルード数について

一方実験観測からは、転波列フロント前後での明確な水深比が存在することが観測される。そこでこの流れのフルード数と水深比の関係を示したのが図-1である。フルード数の増大に伴ってフロント水深比も増大しており、流れと転波列フロントとの間に強い関係があることが判る。これはフロント水深比が流れに大きな影響を及ぼしている現れであると解釈することができる。

5. 流れと速度勾配

ではこのフルード数と次元解析から得られた無次元速度勾配との関係はどうであろうか。これを示したのが図-2である。ここでは速度勾配に（平均流速/平均水深）を用いた。フルード数の増大に伴って無次元速度勾配も増大している傾向が示されていると考えられる。ただ滑面の傾向があまり明確ではない。これは、顕著な転波列ほど個々の独立性が強調されてくるためであると考えられる。言い換えると無次元速度勾配と転波列流れとの関係は、速度勾配が大きくなると転波列の周波数変化および転波列フロントのフォーメーション変化でこの速度勾配の大きな流れに対応していくものと推察されるが、速度勾配がかなり大きくなってくると転波列のフロント水深比や波長の明確な増大が観測され、いわゆる顕著な転波列が形成される。このため、個々の転波列がその存在を独自に維持し始めるため、速度勾配が周期とカップリングしなくなると考えられる。この関係は図-3に示した速度勾配とフロント水深比の関係でも同様である。無次元速度勾配の増大に伴いフロント水深比も増大していく。これはフロント水深比を大きくすることで大きな速度勾配を維持させようとしているようにも考えられる。いずれにしても速度勾配とフロント前後の水深比が転波列を形成することで、あるバランスを保って流下していくことが推察される。

6. 流れのせん断力

こうした速度勾配の卓越した流れ場では、たとえば簡単な疑似等流仮定を用いて考察すると、せん断力 τ は、一般的な流れのせん断力式(3)の第1項が、乱流といえどもは無視できないことが考えられる。ちなみにいま具体的な1例を用いてオ-ダ-計算を試みる。比較的底面近くのせん断力を τ_0 とし、

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} - \rho \overline{uv} \quad \text{---- (3)} \quad \tau_0 = \mu U_0/h_0 - \rho \overline{uv} \quad \text{---- (4)} \quad \tau_0 = \rho g h_0 S \quad \text{---- (5)}$$

ここに、 μ ：粘性係数、 du/dy ：速度勾配、 $-\rho \overline{uv}$ ：レイノルズ応力である。

水路勾配 $S=1/10$ で水深4mm、平均流速1m/sとすると(4)式第1項が(5)式の τ_0 の6%を占めることが判る。さらに転波列流れの平均流速分布を考慮すると、相対水深0.2以下の底面付近では全断面せん断力に対し速度勾配項の占める割合が、10%からさらに20%程度以上にもなることが予想される。

7. 結語

転波列流れは大きな速度勾配を有する流れであり、これが流れのせん断力構造に大きく影響を与えていることが推察された。今後は、転波列流れに関しもう少し定量的な検討を進めていきたいと考えている。

(参考文献)

- 1) Dressler.R.F.: "Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels", Communication on Pure and Applied Mathematics, Vol. II, No.2/3, pp.149~194, 1949
- 2) 室田, 宮島: "超高速流の内部構造に関する実験的研究(2次元乱れ挙動について)", 水工学論文集, 第39巻, pp.379-384, 1995.