

転波列流れの構造に関する実験的検討

大阪産業大学工学部 正員 宮島 昌弘

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、流体力学的な興味にとどまらず、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り、また水路設計に関しても同様に必要なことであると考えられる。しかしながら、これまで具体的な実験結果を踏まえて論じられたものはあまり見当たらないのが実状である。そこで、本研究では転波列流れに関して実験的に整理した結果について、周期特性・流速特性・転波列フロントの水深特性などについて若干の知見が得られたので、これについて報告する。

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て行い、水路上流端より3.9m下流付近を測定地点とした。河床面は滑面と粗面の2種類とし、粗面については粗度の粒径として $D_{84}=1.9\text{mm}$ のものを比較的密に貼り付け、この1/4下方を仮想河床面とした。計測にはレザードップラ-流速計と超音波水位計を用いた。実験条件を表-1に示す。ここに、 $Fr=U_0/\sqrt{gh_0}$ 、 g :重力加速度、 $U_0=Q/(Bh_0)$ 、 B :水路幅、 Q :流量、 h_0 :平均水深。

3. 実験結果と考察

3.1 流れの速度勾配について これまで急勾配上の転波列に関して得られてきた知見は、まず、水深が非常に浅い状態で流れていることであり、そして次に適当な流量が与えられると転波列が発生しそれらが規則的に流下していくと言えるものである。前者についての説明はないが、後者についてはたとえば水深との関わりにおいて、乱流ではフルード数が2を越えると転波列が発生することが古くから示されている。そこで前者の浅い水深について若干考察してみる。いま図-1に転波列の観測波速 c と波頂部付近の平均流速 U の関係を示した。ばらつきはあるが、波速と流速がほぼ一致している。これは転波列フロントでの碎波条件を示すものであると同時に、転波列が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が同われる。また見かけ上、平均的に対数則に近似した流速分布を示す¹⁾ことから、波動というより流れの特徴を強くもつ流れであると考えられる。また図-1から、表面付近の流速が1m/secのオーダーであり、この流れが表-1で示される非常に小さい水深5mmオーダーに出現しているわけであるから、速度勾配の非常に大きな流れであることが判る。この例では200である。つまり転波列流れの特

表-1 実験条件

Run No.	水路勾配S	平均水深 $h_0(\text{mm})$	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

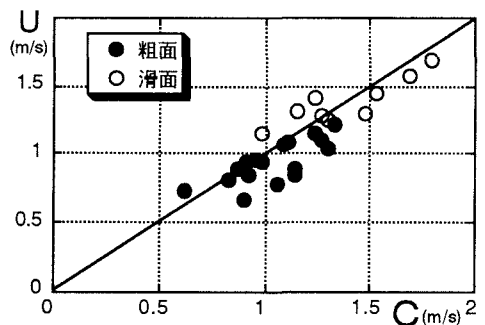


図-1 観測波速と波頂部流速

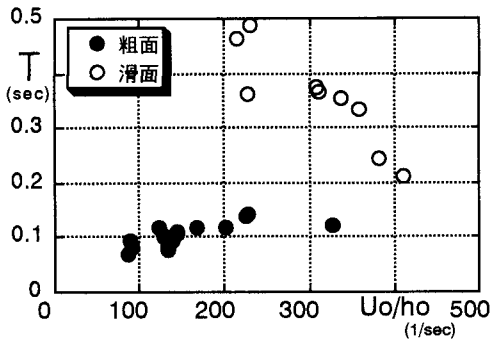


図-2 速度勾配と周期

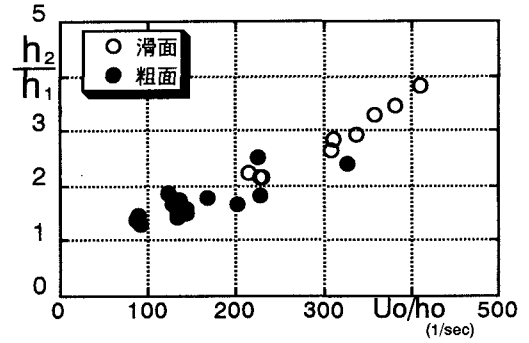


図-3 フロント前後の水深比と速度勾配

微の1つは大きな速度勾配をもつ流れであると言える。

3.2 周期特性について 周期特性については、転波列の発生・維持条件と密接な関係にあるもの考えられるが、ここでは、実験結果からどれだけ転波列の現象を説明できるかについて考察を試みることにする。転波列流れにおいて速度勾配が重要な特徴であることは3.1で述べたが、ではこの大きな速度勾配が転波列とどう関わっているのだろうか。おそらく流れがある速度勾配を越えると転波列が発生することになるのではないだろうか。そしてさらにもっと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。そこで図-2に速度勾配と転波列の周期との関係を示した。滑面、粗面それぞれに傾向は異なるものの速度勾配と周期の関係が強いことが判る。ただ滑面と粗面でそれぞれの傾向が全くことなるのは理解しにくい。これについては後で検討したい。

3.3 転波列フロント前後の水深について 速度勾配と転波列フロント前後の水深比の関係を示したのが図-3である。ここでは速度勾配の増大に伴って水深比も増大し、これらが強い関係にあることが明示される。これは流れ場が速度勾配の大きな流れほど転波列フロント前後の水深比を大きくして速度勾配の大きさを維持しようとしているか、あるいは水深比を大きくすることでさらに大きな速度勾配を出現させようとしているようにも考えられる。いづ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。

3.4 流れの抵抗について こうした速度勾配と流れの摩擦抵抗(マングの粗度係数 n)とが見かけ上どういう関係になっているのかを疑似等流仮定を用いて示したのが図-4である。用いた式は次式である。

$$Q = B h_0 U_o \quad \text{----- (1)} \quad U_o = 1 / n \cdot h_o^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad \text{----- (2)}$$
 ここで特徴的なのは滑面では、ほぼ一定の粗度係数なのに比べ、粗面流れは速度勾配の増大に伴って急激な粗度係数の減少(初期の半分程度にまで減少)が見られることである。これは粗面の場合、速度勾配の増大が流れの摩擦抵抗の様態を大きく変化させることを示している。そしてこのことが先の図-2で示された速度勾配と周期に関して、粗面と滑面がまったく異なった傾向を示す大きな理由であると考えられる。

4. 結語

転波列流れの特徴の1つはその大きな速度勾配であることを示した。今後はこの知見を利用して転波列流れの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) 室田, 官島: "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.