

転波列流れのせん断力特性に関する実験的検討

大阪産業大学工学部

正会員

宮島 昌弘

1. 目的

転波列流れの特性に関しては基本的な点で不明瞭な点が多い。転波列の水理学的特性については、岩垣・岩佐¹⁾が論述しているが、内部構造については、明確にわかっていない。本研究では、急勾配で水深が浅く高速で流下する転波列流れに関しては、流れのせん断力が大きな意味を持つと考えられるため、流れの状況をレイノルズ数との関係について確認し、転波列流れの乱流場におけるせん断力特性について検討する。

2. 実験条件および方法

表-1 実験条件の範囲

水路勾配	Fr 数	Re 数	平均水深 (cm)
1/10	4	2000	0.26
	6.5	8000	0.57

実験は、幅 20cm、長さ 5m のアクリル製可変勾配水路を用い、水位の測定は超音波式水位計を用いて計測した。計測地点は、上流端から 3.7m の地点とした。実験範囲を表-1 に示す。実験水路の勾配は、1/10 を設定し、流量を 0.4~1.5 (ℓ/s) の範囲で変化させて計測した。ここにフルード数: $Fr = U_m / \sqrt{gh_m}$, g : 重力加速度, $U_m = Q/(Bh_m)$, レイノルズ数: $Re = U_m h_m / \nu$, h_m : 平均水深, B : 水路幅, ν : 動粘性係数である。

3. 転波列流れの流速と乱れ強さについて

室田・宮島²⁾は、レーザー・ドップラー流速計を用いた実験結果から転波列流れの流速分布と乱れ強さについて、定常流との比較において言及している。水路勾配 1/174, 水深 11mm, Fr 数 1.1, Re 数 4500 の定常流と水路勾配 1/10, 平均水深 5mm, Fr 数 4.3, Re 数 3900 の転波列流で比較している。図-1 に結果の一部を示しておく。(1) 流速分布については、転波列流れも定常流と同様、見かけ上対数則分布を示している。(2) 乱れ強さについても、 u, v の v については、若干異なるが、ともに見かけ上定常流に近似した分布が示されている。(3) レイノルズ応力については、定常流に比べてかなり異なった結果を示している。つまり転波列流れは見かけ上、対数則分布を示し、乱れ強さ分布にしても定常流とよく似ているが、レイノルズ応力についてはかなり異なることを示しているのである。その理由として、

v についての挙動がレイノルズ応力を見かけ上、定常流と異なったものになっているとしている。では、レイノルズ応力に関して、定常流との差は何に因っているのかということであるが、これは、急勾配上を流下する水深の非常に浅い流れである転波列流れが持つ典型的な特徴である、大きな速度勾配にあると考えられる。つまり、流れ全体が強いせん断力場であり、レイノルズ応力に加えて大きな速度勾配に伴う粘性応力の存在が、転波列流れに強い影響力を及ぼしていると考えられる。

4. 具体的なせん断力について

流れの流速分布が見かけ上対数則分布に近似していることから、オーダーの議論として、速度勾配について、平均的に水路床から $0.4h_m$ で平均流速 U_m となると仮定して、河床面から $0.2h_m$ の地点の速度勾配を $U_m/0.4h_m$ として計算してみる。たとえば、水路勾配 1/10 で Re 数 4000 程度の水理条件だと $U_m=1\text{m/s}$, $h_m=0.5\text{cm}$ 程度となるので、速度勾配 $U_m/0.4h_m$ は $500/\text{s}$ となる。粘性係数を $0.01\text{g/cm}\cdot\text{s}$ とすると、この点での粘性せん断力 τ_v は、 $\tau_v = \mu du/dh$ を

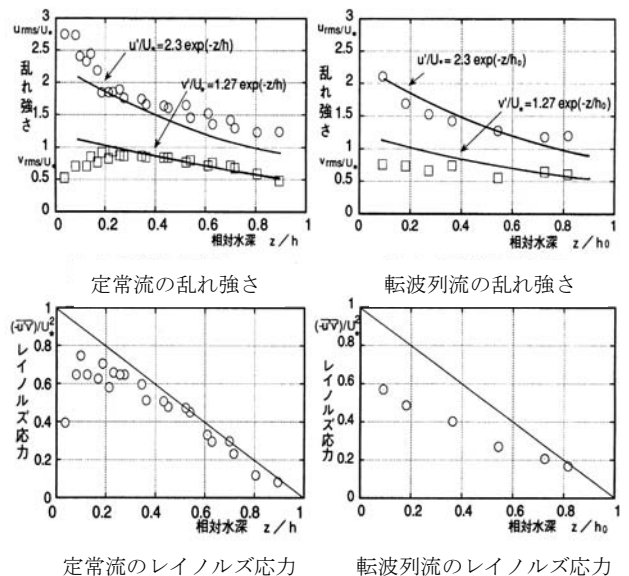


図-1 定常流と転波列流れの乱れとレイノルズ応力

急勾配水路, 薄層流, 転波列, 段波

〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1 大阪産業大学工学部 TEL 072-875-3001

$\tau_v = \mu U_m / 0.4h_m$ で近似すると、直接粘性に関わるせん断力 $\tau_v = 0.5N/m^2$ となる。一方、河床面せん断力 τ_0 は、 $\tau_0 = 4.9 N/m^2$ となり、1 割程度のせん断力を粘性の項が受け持つ形となることが判る。これが、図-1 の定常流と転波列流におけるレイノルズ応力の差となっていると推定される。

5. 底面せん断力について

宮島³⁾は、水路底面に直接せん断力計を設置して計測した結果を示している。その内容は、転波列流れにおいても平均的には、定常流における底面せん断力とほぼ同じ大きさが働いており、水位と底面近傍の流速の相互相関係数からほとんど水位と同時刻に底面に底面せん断力が作用していることを示している。つまり転波列流れの底面せん断力は、見かけ上平均的に定常流と同様の大きさを示し、その変動は水位変動と共にあることを示している。

6. 流れのせん断力について

一般に定常流れのせん断力および河床せん断力は(1)・(2)式を用いて示される。本文では、(1)式の第1項の粘性項を τ_v としている。

$$\tau = \mu du/dh - \rho \overline{u'v'} \quad \text{----- (1)}$$

$$\tau_0 = \rho g R I \quad \text{----- (2)}$$

これまで述べてきたように転波列流れにおいては、このせん断力 τ_v τ_0 が大きな支配因子として転波列流れに影響力を及ぼしていることが推定される。また転波列流れの整理にはレイノルズ数が有効であることがわかってきている⁴⁾。ここでは、まず転波列流れの典型的な特徴であるフロント前後の水深比とレイノルズ数の関係を図-2 に示しておく。レイノルズ数の増大に伴い、転波列フロント前後の水深比が減少する傾向にあることがわかる。同様にレイノルズ数と τ_v (ここでは、 $\tau_v = \mu U_m / 0.4h_m$ を用いた) と河床面せん断力 τ_0 の関係を図-3 に示す。レイノルズ数の増大に伴い、 τ_v / τ_0 の値も同様の傾向が示されている。これらから転波列流れにおける内部せん断力とフロント水深比の関係が想定される。そこで、フロント前後の水深比とせん断力比 (いわば内部せん断力 τ_v / 河床面せん断力 τ_0) の関係を示したのが、図-4 である。横軸のせん断力比の増大に伴い、フロント前後の水深比も増大していく傾向が明瞭である。これは河床面せん断力に関し、内部粘性せん断力の割合が増大するに伴い、転波列フロント前後の水深比を増大させて流下していく転波列流れの現象が示されているものと考えられる。

7. 結論

本研究では、転波列流れのせん断力に関する検討を行った。その結果、流れの速度勾配が重要な因子であることが判った。この大きな速度勾配が、粘性せん断力として転波列流れに影響を及ぼしていることが示された。そして、この内部せん断力と河床面せん断力とに関わって、転波列フロント前後の水深比が存在することが推定された。転波列のフロント前後の水深比は、言わば内部粘性力と河床せん断力との比に応じて、変化し形成されていくことが推察された。今後さらに定性的・定量的な結果を得たいと考えている。

参考文献

- 1) 岩垣・岩佐: “転波列の水理学的特性について - 薄層流に関する研究, 第7報 -”, 土木学会誌, 第40巻, 第1号, pp. 5-12, 1955.
- 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.
- 3) 宮島, “転波列流れの流速とせん断応力の挙動について”, 日本流体力学会誌, ながれ, 第23巻別冊, 日本流体力学会年会 2004 講演論文集, pp. 236-237, 2004.
- 4) 宮島・滝野 “転波列流れの存在条件に関する実験的研究”, 土木学会第63回年講, 2008.

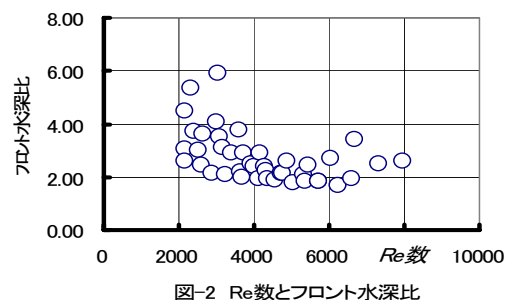


図-2 Re数とフロント水深比

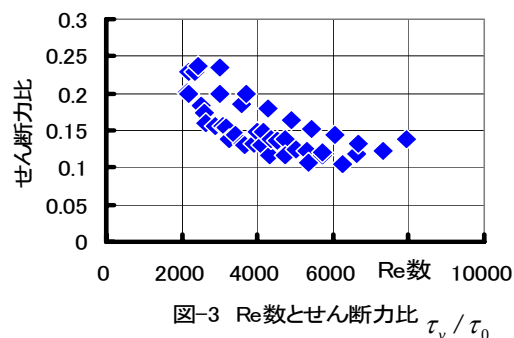


図-3 Re数とせん断力比 τ_v / τ_0

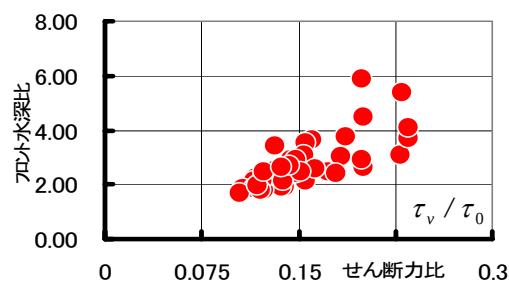


図-4 粘性せん断力/河床せん断力とフロント水深比