

粗面・滑面における境界層圧縮を伴うシートフローの流れの状態について

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○仮澤 広晃
新潟大学 BDA 研究センター 正会員 茂木 大知
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

レイノルズが 19 世紀末に提案したレイノルズ数は、粘性と慣性の比を一つの指標に集約し、層流・乱流の判定を可能とした。以後、学術と実務の多くにおいて、レイノルズ数の大小により層流と乱流という二分的な理解を前提に、粗度や相対水深と組み合わせて摩擦則や工学的な設計法を発展させてきた。ところが、空気力学分野では 1960 年代から、強い有利圧力勾配下で乱流境界層が急速に弱まり、速度分布が層流的形状を示す再層流化現象 (relaminarization)^{1),2)} が繰り返し報告されている。その後、急激な加速を受ける管路に加え、最近では開水路³⁾ でも同様の振る舞いが観測されている。つまり、レイノルズ数に依拠した乱流強度やレイノルズ応力の説明が困難な事例が蓄積しつつある。

著者らは最近、滑面条件の急斜面上を流下するシートフローで、強い加速のもと乱流が抑制され、鉛直方向にほぼ一様となるプラグ型の速度分布が現れることを実験的に示した⁴⁾。開水路流れの中でも、特に薄層のシートフローは、境界層が水深規模まで容易に発達し、自由水面が動的境界として乱流生成や輸送に寄与する⁵⁾ ため、擬似層流の形成は不利と考えられる。それにもかかわらず、この研究では、平均水深の約 50 倍に及ぶ流下距離でこの状態が持続することを示している。この結果は、従来の空気境界層における再層流化が、大半の場合では境界層厚さの数十倍で再遷移するという常識⁶⁾ とは対照的である。また、著者らは、この研究において、古典的な層流解への逆遷移と区別するため、これを擬似層流 (laminarecence) と呼称することを提案している。

上述した滑面条件上のシートフローにおいて形成された擬似層流の測定結果は、レイノルズ数が大きい条件の方が乱流強度が抑制されていることを示した。仮に、粗面条件上のシートフローにおいても同様の傾向が示される場合、レイノルズ数の大小のみで流れの状態は十分に説明できないことを示す重要な知見となる。そこで、本研究では、シートフローにおける擬似層流の普遍性を示すことを目的とし、底面の粗度を粗面条件とした急斜面上のシートフローにおける流速と乱流強度について計測した。次に、この粗面条

表-1: Re ; レイノルズ数)

Member	流量 [L/min]	粗度	Re
S1	203	滑面	6719 - 8175
S2	81	滑面	2768 - 3790
R1	203	粗面	6667 - 7670
R2	81	粗面	2350 - 3932

件と最近の著者らの滑面条件でのシートフローの観測結果とを比較し、流れの状態の把握にあたっては、レイノルズ数による二分法を、加速度や時間スケールなどに基づく解釈へ転換すべきことを論じた。

2 研究方法

2.1 実験条件

本研究では、堤防を模した急斜面水路を用いたが、その仕様は前報⁴⁾ と同様のため割愛する。表-1 に水理条件を示す。本研究では、堤体模型の表面における滑面条件 (S1、S2) に加え、模型表面に耐水布やすり (粒度 40 番手) を付着させた粗面条件 (R1、R2) を設定した。 Re は堤体斜面 ($x > 0$) の計測点におけるレイノルズ数の範囲である。

2.2 計測手法

流速 $\bar{u}$ および乱れ成分 u' の計測にはレーザードップラー流速計を用い、堤体の裏法肩から上流 ($x < 0$) では水路と並行に、堤体斜面では斜面方向に計測した。縦断方向の各計測点において、鉛直方向に等間隔で 9 点計測し、いずれも取得する流速値は 10000 個とした。水深 D は Stream Tomography⁷⁾ を用いて計測した。

3 結果

図-1、図-2 に流速の無次元鉛直分布 ($\bar{u}/U$ 、 U は断面平均流速)、および乱流強度 ($\sqrt{u'^2}/U$) の鉛直分布を示す。紙面の都合上、結果は代表的な計測点のみを抜粋した。

まず、流速分布についてである。 $x \leq 40$ の範囲では、底面近傍で小さく水面に向かって大きくなる境界層構造を持つ鉛直分布が形成され、この傾向は全ての条件に共通である。その後、流下に伴い直立型の分布に遷移するが、 $x > 40$ では粗滑によって形成される鉛直分布には差異がある。粗面条件の場合、上流で形成された直立型の分布が急速に崩

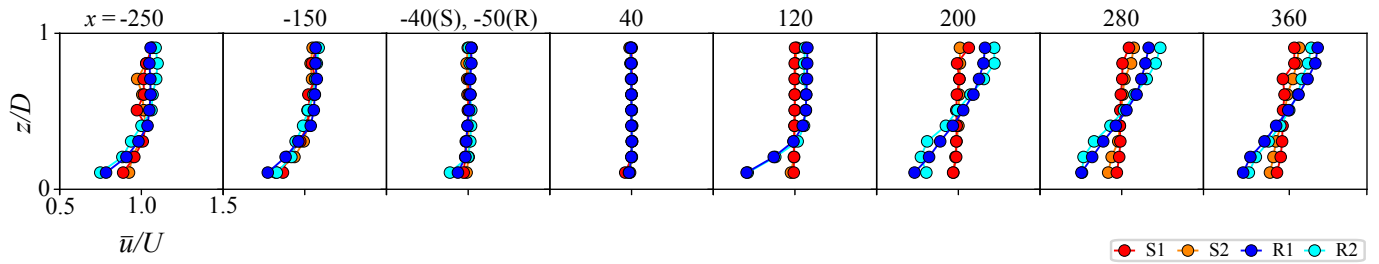


図-1: 流速分布

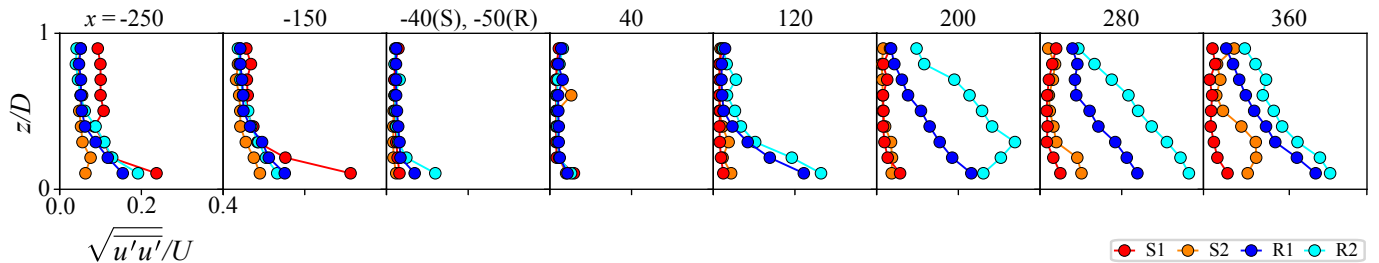


図-2: 乱流強度分布

れ、水深方向の速度差が拡大する。

次に、乱流強度の分布についてである。底面の粗滑に依らず、 $x \leq 40$ の範囲では、乱流強度は下流方向に向かうに従って低減し、直立した分布が形成されることがわかった。 $x > 40$ の範囲では、粗面条件において底面近傍の乱流強度が増大し、水深全体で乱流強度が卓越するようになる。また、流量の大小、つまり表-1に示すレイノルズ数の大小で比較すると、レイノルズ数が3000ほどのS2とR2の方が、レイノルズ数が8000ほどのS1とR1よりも水深全体で乱流強度が概して大きいことがわかる。

4 考察

本研究の観測を通して、一定以上の強い有利圧力勾配(加速)の条件においては、滑面のみならず粗面条件でも鉛直構造が層流様に転じ、擬似層流が形成されることがわかった。また、本研究において特筆すべきことは、レイノルズ数の大小の観点で乱流強度を比較すると、滑面と粗面の両方の条件において、レイノルズ数が大きい条件の方が乱流強度が抑制されることである。

これらの結果は、レイノルズ数に依存せずに、流れの状態を記述する必要性を示唆するものである。通常、乱流の回復には一定の内部時間を要するが、相対粗度が小さいと乱流再生産が相対的に弱まり、乱流の抑制状態が持続しやすい。さらに、レイノルズ数が大きい条件や底面摩擦が小さい条件では、平均流 U が大きくなるため、生産された乱流はより速やかに輸送され、水深全体に波及するための滞留時間が相対的に不足する。粗面のレイノルズ数が小さい条件であるR2において、斜面下流側ほど乱流強度が低下した要因としては、全条件の中で最も乱流が早期に回復し

全層化しやすく、 U の速度増加が抑制されたものと解釈できる。

5 結論

本研究では、まず、模型実験により底面が粗面条件の急斜面上のシートフローを細密に計測し、粗面条件においても擬似層流が形成されることを示した。次に、急斜面上のシートフローは、滑面と粗面のどちらもレイノルズ数が大きい条件の方が、水深全体の乱流強度が抑制されていることを確認した。これらの結果は、流れの状態の把握にあたってはレイノルズ数による二分法から脱却し、加速度や時間スケールなどに基づく解釈への転換の必要性を示唆する。

参考文献

- 1) R. Narasimha and K. R. Sreenivasan : Relaminarization of fluid flows, *Adv. Appl. Mech.* 19, 221-309 (1979).
- 2) K. R. Sreenivasan : Laminarizing, relaminarizing and retransitional flows, *Acta Mech.* 44, 1 - 48 (1982).
- 3) 山上 路生, 前口 和哉 : 加速開水路流の再層流化メカニズムに関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 76 巻, 2 号, p. I.1069-I.1074, 2020.
- 4) H. Karisawa, H. Yasuda : Acceleration-induced laminarization of sheet flow over smooth steep slopes, *Phys Fluids* 37(8), 085198, 2025.
- 5) I. Nezu : Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century, *J. Hydraul. Eng.* 131, 229-246, 2005.
- 6) Mukund. K. et. al. : Relaminarization in highly favourable pressure gradients on a convex surface, *J. Fluid Mech.* 566, 97-115, 2006.
- 7) D. Moteki et. al. : Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, 34, 034117, 2022.