

2025年8月27日

新潟大学

河川の乱流制御の可能性につながる新発見

－ 水害の大幅な削減につながる河道や都市排水施設の設計が可能に －

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程2年の仮澤広晃（次世代研究者挑戦的研究プログラム採択者）、同大学災害・復興科学研究所／研究統括機構の安田浩保研究教授らの研究グループは、急斜面を流下する浅水の高速な流れにおいて、乱流¹⁾が抑制され秩序的な構造（擬似層流）が形成される現象を実験的に発見しました。従来、流れの状態はレイノルズ数²⁾によって層流³⁾か乱流に分類されると考えられてきましたが、本研究はその理解に再考を促す成果です。このような秩序構造は、将来的に河川流れの制御や摩擦損失⁴⁾の設計的操作など、新たな流体設計の可能性を示唆するものです。本研究成果は、2025年8月19日（EDT）、国際科学誌「Physics of Fluids」のオンライン版に掲載されました。

【本研究成果のポイント】

- 滑らかな急斜面を流下するシートフローにおいて、流れの加速により乱れの成長が抑制され、秩序的な流速構造（擬似層流）が形成されることを実験的に確認しました。
- 形成された擬似層流は、完全に乱流とされる高レイノルズ数条件下でも平均水深の50倍以上という長距離にわたって持続し、層流と乱流の二分法的理解に対して新たな知見を与えます。
- 擬似層流の安定性とその形成条件に関する実測データは、堤防越流など実流場における流体設計の新たな可能性を示し、摩擦損失の設計変数化や河川・都市排水設計の自由度向上につながると期待されます。

1. 研究の背景

山間丘陵や都市域の比較的勾配の大きい斜面では、降雨により水が地表を薄く広がって流れる「シートフロー」と呼ばれる流れが形成されます。これは大気と水が接し水面をもつ開水路流れの一形態であり、私たちの身近な例としては、舗装された道路の傾斜面を雨水が流れ下る様子などが挙げられます。

この種の流れは、主に水文・水資源工学分野で研究されてきましたが、その多くは平均的な経験則に基づく評価にとどまっています。ミクロな視点から見ると、シートフローは河川のよ

うな開水路流れに比べて流速が非常に速く水深が浅いため、壁面との摩擦が強く作用し、流れ全体に乱れ（乱流）が卓越しやすいという特徴をもちます。

しかし、その内部構造や乱流特性に直接迫った精密計測は世界的にも限られており、その物理機構の解明はこれまで十分には進んでいませんでした。

II. 研究の成果

こうした背景を踏まえ、本研究グループは、流体内部の詳細な流速計測が可能なレーザードップラー流速計（LDV）を用い、堤体を越えて急斜面を流下するシートフローにおける流速と乱れの強さ（乱流強度）の鉛直分布を、流れ方向に沿って精密に計測しました。図1の上段には測定位置を、中段と下段にはそれぞれ流速分布と乱流強度分布を示しています。

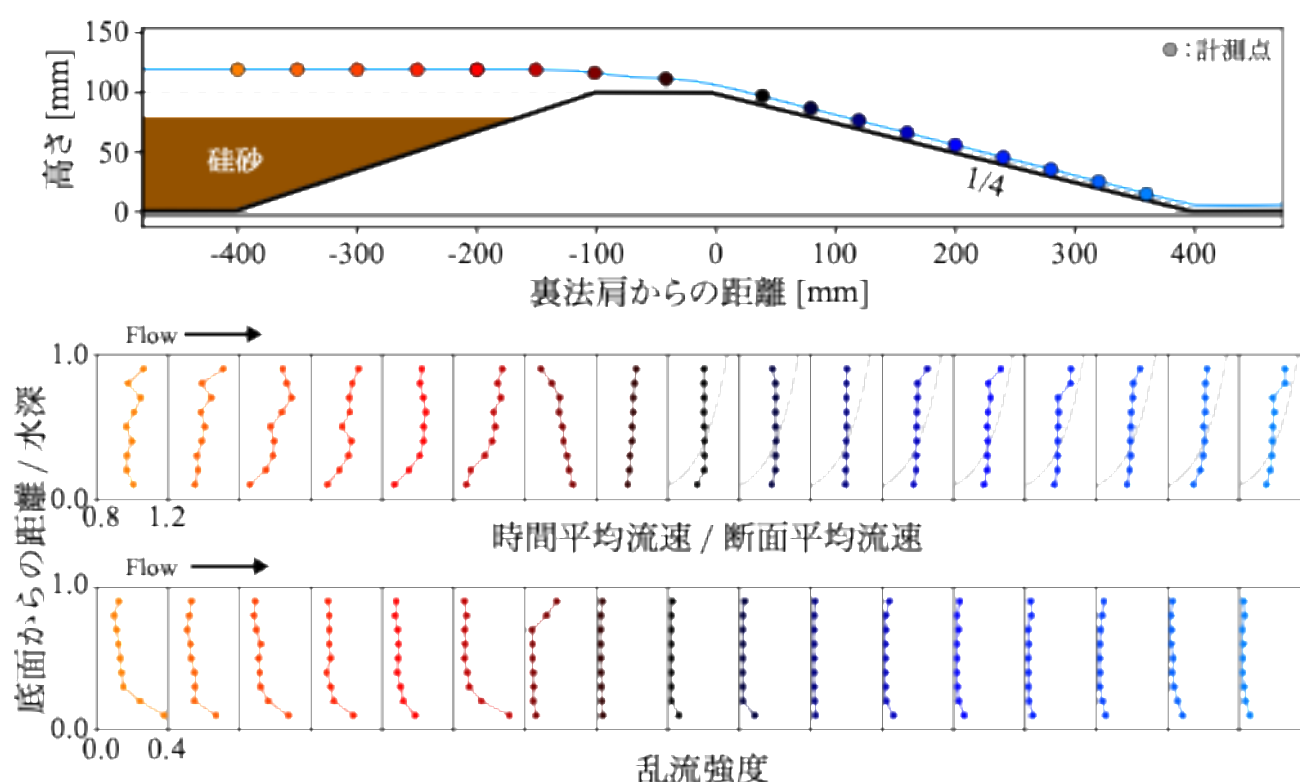


図 1：堤体上のシートフローにおける流速分布と乱流強度分布

その結果、堤体を越える流れでは、鉛直方向に直立した流速分布が次第に形成されることが明らかになりました。通常、乱れが十分に発達している場合には、灰色の線で示すような典型的な対数則型の鉛直分布が得られると予想されます。しかし、今回の計測では、堤体の急斜面全体にわたり、この予測から大きく逸脱した分布が連続的に出現していました。

乱流強度についても同様の傾向が確認されました。堤体上流側では乱れが強く分布していたものの、堤体上を流下する過程で次第に抑制され、最終的には流速分布と同様に直立かつ低減した状態へと変化していました。こうした秩序だった流速構造と乱流抑制状態は、急斜面全域で安定的に維持されていました。

これらの現象は、主に空力分野で報告されてきた、流れ方向に一定以上の加速度が作用することで乱れの成長が抑制される「再層流化」と同質のメカニズムと考えられます。しかし、開水路流れにおいて、擬似層流の形成とその安定的な持続を明瞭に捉えた事例はこれまで存在しませんでした。本研究は、開水路流れにおける広範囲かつ安定した擬似層流を、世界で初めて実証したものです。

なお、従来はこの現象を「再層流化（re-laminarization）」と呼ばれていましたが、この語はレイノルズ数の低下を連想させ、現象の正しい理解を妨げる可能性があるため、本研究では実態をより正確に表す用語として、「laminarrescent」を新たに提案しました。

III. 今後の展開

1883 年、イギリスの土木工学者オズボーン・レイノルズは、流れの状態を「層流」と「乱流」に大別できることを提唱しました。以来、レイノルズ数が大きければ乱流になるという理解が流体力学の基本原則として広く受け入れられています。ところが本研究は、完全に乱流域とされる条件下においても、流れに一定規模の加速が作用すると、層流的な内部構造が安定して出現しうることを実験的に示しました。これは、自然界の多くの流れが勾配や流路形状の変化に伴って加速と減速を繰り返している現実を踏まえると、擬似層流は想定以上に広い範囲に容易に形成されている可能性を強く示唆します。すなわち、従来「乱流」を前提に議論されてきた自然における様々な流れは、実際には乱流と擬似層流が混在する形態（図 2）であると再評価すべきであり、本研究は流体力学の基礎的理解に一石を投じる成果といえます。

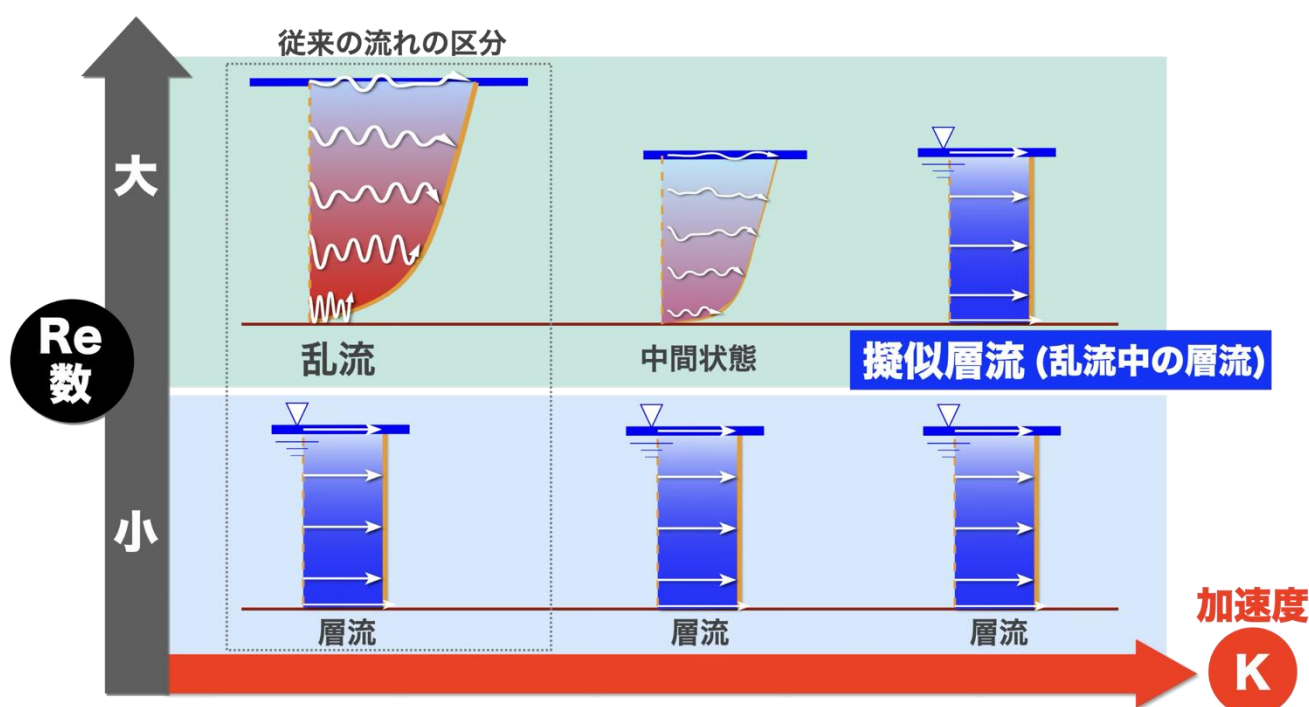


図 2：流れの状態の新たな区分

近年、記録的豪雨による河川氾濫が相次ぎ、特に越流（堤防を乗り越えた洪水）による堤防の侵食や決壊が社会的課題となっています。本研究で明らかになった擬似層流化現象は、長時

間の越流から堤防を守るための新たな設計指針を提示する可能性を秘めています。現行の水理設計では、対数型乱流場を前提に摩擦損失を一定値として扱いますが、これは流れの加速による乱流構造の変化を考慮していない設計方針です。もし、加速度が内部構造に与える影響が広く確認されれば、摩擦損失を「設計可能な変数」として扱うことが現実味を帯びてきます。これにより、堤防表面の構造設計にとどまらず、河道設計や都市排水施設設計の自由度が飛躍的に高まり、水害の大幅な軽減につながる革新的な設計が可能になると期待されます。

IV. 研究成果の公表

本研究成果は、2025 年 8 月 19 日（EDT）に国際科学誌「Physics of Fluids」のオンライン版にて公開されました。

【論文タイトル】 Acceleration-induced laminarization of sheet flow over smooth steep slopes

【著者】 H. Karisawa and H. Yasuda

【doi】 10.1063/5.0279763

V. 謝辞

本研究は、新潟大学次世代研究者挑戦的研究プログラム（JPMJSP2121）および科研費（JP21H05084、JP21H04596、JP22H00512、JP24H00365）の助成を受けて行われました。

【用語解説】

- 1) 乱流（らんりゅう）：流れの中に大小さまざまな渦や乱れが不規則に発生し、空間的にも時間的にも複雑な変動を伴う状態です。速度や圧力が激しく変動し、予測が難しい一方で、自然界の河川流や雨水流など、実際の多くの流れはこの乱流状態にあります。
- 2) レイノルズ数（Reynolds number）：流体の運動状態を分類するための代表的な無次元数であり、流れが層流になるか乱流になるかの目安として用いられます。一般に、レイノルズ数が小さいと層流、大きいと乱流と判別されます。
- 3) 層流（そうりゅう）：流体が層状に整然と流れる状態を指します。水や空気のような流れが、互いに滑りながらほとんど混ざり合うことなく、平行に流れているのが特徴です。流れの中に大きな渦や乱れは見られず、流速分布や圧力の変化も滑らかで予測しやすいという性質があります。
- 4) 摩擦損失：流体が壁面や底面などと接することで生じるエネルギーの損失のことを指します。これは、流体内部のせん断応力（流れを抑えようとする力）に起因し、流れに沿った方向にエネルギーが徐々に失われていきます。一般には、流速や水深、底面の粗さによって変化します。

本件に関するお問い合わせ先

新潟大学災害・復興科学研究所／研究統括機構
研究教授 安田 浩保（やすだ ひろやす）

E-mail：hiro@gs.niigata-u.ac.jp