

急勾配水路で壊れる流れと生き残る流れ

—等流と転波列の数理—

概要

京都大学大学院農学研究科の宇波耕一准教授、松徳優佳同修士課程学生、ドイツ・ヨルダン大学の Dia Zeidan 教授の研究グループは、急斜面の水路においてある条件のもとでは、等流と呼ばれる滑らかで一様な流れは壊れ、転波列と呼ばれる不連続を含む流れが壊れずに生き残ることを数学的に明らかにしました。転波列は、ダム の洪水吐放水路などの設計に影響する重要な現象であり、日常でも雨天時に急坂のアスファルト路面に現れる身近な流れです。本研究では、現代の流体力学で広く用いられる「弱エントロピー解¹」の理論を用いることにより、農業工学や土木工学では理解が不十分であったこれらの現象に、厳密な説明を与えました。この成果は、現行の公共事業における水理構造物の設計基準が、安定な定常流のみを前提としているという根本的な問題を示唆しています。今後は、転波列の特性を魚道などの生態系配慮型構造物に応用する研究を進める予定です。本研究成果は、2026 年 9 月 15 日に国際学術誌「*Physics of Fluids*」にオンライン掲載されました。



蔵王ダム（日野川流域土地改良区）とヨルダン王国カラク県の道路で見られた転波列（宇波撮影）

1. 背景

転波列は急斜面の水路で自然に発生する不連続を含む流れであり、ダムをはじめとする水理構造物の安全性に大きく関わります。雨天時の坂道でも観察できる身近な現象ですが、これを記述する浅水方程式の数理的性質は十分に理解されていませんでした。日本の公共事業では定常流を前提とした設計が一般的であり、非定常流が重要となる場合の規準がないことが研究の出発点となりました。

2. 研究手法・成果

まず、ある条件のもとでは、等流は浅水方程式の解として存在するものの不安定であることを証明しました。一方、波形を変えずに一定速度で進行し、かつ、不連続を含む転波列が、「弱エントロピー解」として存在することを示しました。また、数値実験により、理論で示された転波列の発展過程を視覚的に確認しました。これは、浅水方程式のような特殊な形をした偏微分方程式に関しては新しい結果です。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、現行の水理構造物の設計基準が重要な非定常現象を見落としている可能性を示しています。また、転波列は魚道の設計にも応用できる可能性があります。転波列を意図的に形成することで、上流への移動を妨げる水流抵抗と促進する走流性刺激という、遡上魚に働く二つの相反する効果のバランスを取ることが期待されます。今後は、流体力学的解析と生態学的設計を統合し、安全性と生態系保全の両立を図る研究を進めます。これは SDGs の 6・9・14 にも貢献する取り組みです。

4. 研究プロジェクトについて

科研費基盤(C) No. 25K09329 「急勾配水路における開水路水理学の刷新」

日本学術振興会二国間交流事業共同研究 No. JPJSBP120269923 「イラク北部における気候変動適応戦略の基盤となる数学理論の新たな展開」

京都大学分野横断プラットフォーム構築事業 No. 95 「Local Environmental Phenomena and Non-Local Mathematical Models」

<用語解説>

¹ 弱エントロピー解：微分方程式の解が不連続を含んでも破綻しないように、“積分の形”でゆるく扱えるようにし、そのうち物理的に正しい変化だけを選び取るためのルールを加えたもの。

<研究者のコメント>

転波列の数学的必然性や景観的美しさと、土木工学分野での理解の浅さとのギャップが、本研究を進める強い動機となりました。基準にあるからというだけで、現実には発生しない現象を想定した設計がまかり通る状況に違和感を覚え、厳密な数理解析によって現象の本質を明らかにする必要があると感じました。転波列は決して特殊な現象ではなく、方程式が示す基本的なふるまいです。この理解が、水理構造物の安全性向上、生態系保全、そして景観創生につながることを期待しています。(宇波耕一)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Ill-posedness of uniform flows and formation of roll waves in the one-dimensional shallow water equations (1次元浅水流方程式における等流の非適切性と転波列の形成)

著 者：Koichi Unami, Dia Zeidan, Yuka Matsutoku

掲 載 誌： *Physics of Fluids* DOI : 10.1063/5.0341050