

拡縮構造物によって生じる流れ構造の定量化

新潟大学 工学部工学科
新潟大学 ビックデータアクティベーション研究センター
新潟大学大学院 自然科学研究科
新潟大学 災害・復興科学研究所

学生会員 ○和田 希星
正会員 茂木 大知
学生会員 仮澤 広晃
正会員 安田 浩保

1 はじめに

砂礫河川において河道が人為的に直線化されると交互砂州が形成される。交互砂州が発達すると、流れはこれを避けるようになり、同一断面内の標高差が拡大する。その結果、治水の観点では、樹木の繁茂による流下能力が低下し、環境保全の観点では、生物多様性が低下する。

著者らは、交互砂州の発生が抑制されている自然河川では流路幅が流下方向に増減していることに着想を得て、砂州発達を抑制する拡縮流路工法（以下、拡縮工法）を考案している。拡縮工法は、早出川（新潟県）などの7河川に実装されている。一般に、交互砂州が発達した河川の横断面形状は凸型となり、その結果、洪水流は岸沿いに偏る。一方、拡縮工法を適用した河川では、設置後に複数回の洪水を経験すると横断面形状は自発的に凹型となり、洪水流は断面中央を流れるようになる。これに加え、多様な流速場の発現による生態系の回復も確認されている^{1),2)}。現時点では、拡縮工法を適用する河川において、交互砂州の半波長程度の間隔で流路幅を増減させると効果が得られることが分かっている。しかし、力学的な観点からその流れ構造や有効な設置間隔について説明されていない。

十分な加速流れが形成されると、高レイノルズ数の流れでも、境界層が圧縮され、水深の数倍ほどの限られた範囲に層流様式の秩序的な流速分布が形成される、擬似層流化という流体現象が形成される。^{3),4),5)}。最近、開水路の加速流において、従来の知見を遥かに超える水深の50倍以上の範囲にわたる擬似層流の形成が発見された⁶⁾。拡縮工法は流路幅の増幅により、空間的な流れの加減速場を生み出す¹⁾。この場の加速が十分である場合、拡縮工法によって擬似層流が誘発され、その存在範囲によって設置間隔の設計に具体的な知見が得られる可能性がある。

以上を踏まえ、本研究では、拡縮工法による擬似層流の形成とその存在範囲による流体力学的な設置間隔の知見を得るため、模型実験を行った。具体的には、拡縮工法に用いる構造物（以下、拡縮構造物）を設置した固定床実験を実施し、流れの鉛直流速分布を縦断的に測定し、そこでの乱流強度と加速度を定量化した。

2 模型実験による流れの実測

2.1 実験条件

実験は、早出川¹⁾の拡縮構造物を模した水路図-1で実施した。流量は90 L/min、水路勾配は1/200とし、拡縮構造物が形成する流れを詳細に測定するため固定床とした。

2.2 実験手法

流速の測定には、非接触で測定が可能なレーザードップラー流速計 (LDV) を用いた。測定点は、図-1のように、拡縮構造物の影響が十分に収まる範囲を設定した。各測定点では、まず、水深をポイントゲージで測定し、流速を実測した水深を8等分して各層で測定した。流速測定は、十分な信頼性を担保するために約10,000個のサンプルを取得した。

3 結果と考察

3.1 流速および乱流強度

図-2に、断面平均流速で除した層平均流下方向流速 U/U_m および乱流強度 $\overline{u'u'}$ の鉛直分布を示す。紙面上の制約により、図中には図-1で黒点で表した箇所のみを示す。図中には、比較対象として、明瞭な対数型の流速分布となった $x = -140\text{cm}$ 点における結果を点線で併記した。また、図-3に示す水深の縦断分布から、構造物より上流では水深が増加する減速区間であり、構造物の下流では水深が急激に減少する加速区間である。

まず、図-2の上段のとおり、拡縮構造物の頂点部分の $x = 10\text{cm}$ 点において対数則型とは異なる直立した流速分布が形成されていることがわかった。同図の下段よりこの点における乱流強度を確認すると、 $x = -140\text{cm}$ 点の値と比べ、数%ほどであった。また、 $x = -20\text{cm}$ 点から $x = 10\text{cm}$ 点の範囲についても、加速区間であるにも関わらず、その乱流強度は $x = -140\text{cm}$ 点の数%にまで縮退していた。さらに下流の $x = 60\text{cm}$ 点では、 $x = -140\text{cm}$ 点よりも一時的に約100倍もの乱流強度となり、その後、 $x = -140\text{cm}$ 点の値に漸近した。これらの結果から、拡縮構造物設置による流れへの影響は $x = -140\text{cm}$ 点から $x = 140\text{cm}$ 点と水深の約300倍もの範囲にわたることが確認できる。

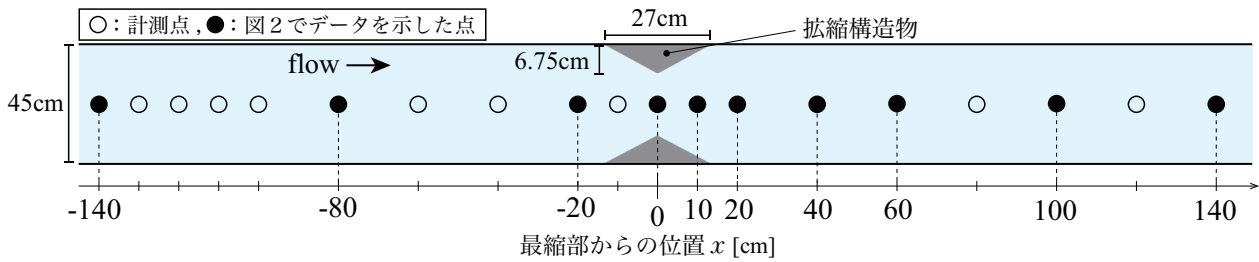


図-1: 水路模型縦断面図

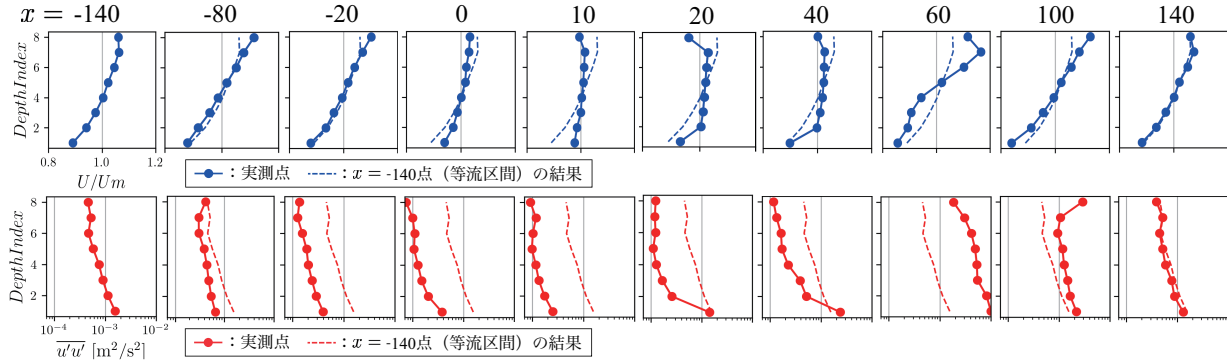


図-2: 流下方向流速 U/U_m (上段) および乱流強度 $\overline{u'u'}$ (下段) の縦断分布

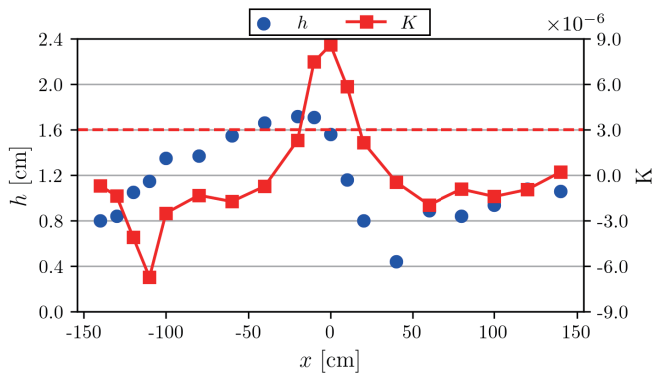


図-3: 水深 h および加速度パラメータ K の縦断分布

3.2 加速度パラメータによる擬似層流の形成の判定

一般に乱流強度の実測手法は限られ、乱流強度により擬似層流の存在を把握することは難しい。これに対して、空気流体力学の分野において、加速度を指標として擬似層流の発生を判定できることが報告されている³⁾。また、最近、開水路流れにおける擬似層流の発生も加速度パラメータの K によってある程度説明できることが示されている⁶⁾。

$$K = \frac{\nu}{U_s^2} \frac{dU_s}{dx} \quad (1)$$

ここで、 ν は水の動粘性係数、 U_s は自由流の流速である。

図-3 に、各測定点の最も乱流強度の小さい層を自由流と見做して求めた K の縦断変化を示した。従来の研究では $K > 3.0 \times 10^{-6}$ が閾値として擬似層流の形成を判定できると言われている³⁾。この図より、乱流強度の縮減が確認できた $x = -10$ cm 点から $x = 10$ cm 点における K

は閾値を超えており、擬似層流状態であったといえる。一方で、その範囲外であっても乱流強度は縮減されており、拡縮工法の効果は既往知見が推定する指標に基づく範囲よりも広いことが示唆された。

4 おわりに

本研究では、拡縮構造物周りに擬似層流が形成されるかどうかを調べた。その結果、拡縮構造物の頂点付近の断面中央において加速流による擬似層流の形成が確認された。また、拡縮構造物設置による流れへの影響は水深の約 300 倍もの範囲にわたっていることもわかった。

今後は、拡縮構造物の設置間隔を流体力学的に規定するため、実際の河川を模した移動床における測定も実施する予定である。

参考文献

- 1) 梅木康太郎, 安田浩保: 早出川に設置した拡縮構造物の効果の経年変化について, 土木学会関東支部新潟会, 2020 年 10 月
- 2) 梅木康太郎ら: 早出川における拡縮流路が有する治水機能と環境機能の実証, 河川技術論文集, 第 27 巻, 2021 年 6 月
- 3) R. Narasimha and K. R. Sreenivasan: Relaminarization of fluid flows, *Adv. Appl. Mech.* 19, 221-309 1979.
- 4) J. Kühnen, et al.: Relaminarization by steady modification of the streamwise velocity profile in a pipe, *Flow, Turbulence and Combustion* 100, 919-943 2018.
- 5) Sanjou: Local gas transfer rate through the free surface in spatially accelerated open-channel turbulence, *Physics of Fluids* 32, 105103 2020.
- 6) H. Karisawa, H. Yasuda: Acceleration-induced laminarization of sheet flow over smooth steep slopes, *Physics of Fluids* 37 085198, 2025.