第Ⅱ部門　　桟粗度の形状および間隔が開水路射流の水面変動特性に及ぼす影響

京都大学　学生員　○呉　許剣
京都大学　正会員　　山上路生
京都大学　正会員　　松本知将

１．はじめに

開水路底面の桟粗度が形成する剥離・再付着流は，水面応答や粗度間の運動量輸送に影響する．この応答は，粗度間の土砂堆積・流出過程にも関わると考えられる．Leonardi et al.[1]は正方形桟の間隔により再循環域と形状抵抗が変化することを示した．Dolcetti et al.[2]は浅水粗面流の水面変動スペクトルが水面波と下層乱流の情報を含むことを明らかにし，Luo et al.[3]は段落ち背後の大規模渦と水面変形の時空間応答を関連づけた．

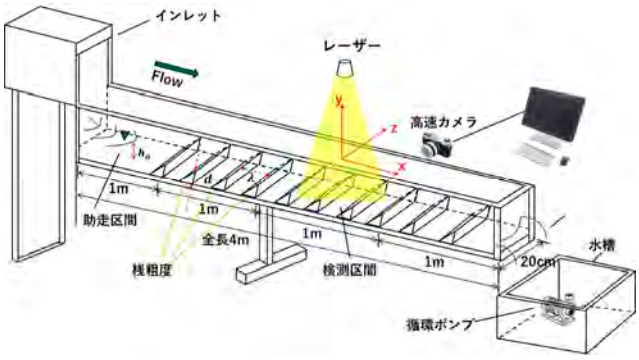
そこで本研究では，著者らによる三角柱・四角柱の後流構造と水面応答の定性的比較を発展させ，浅水射流条件下で相対粗度間隔とフルード数を変化させる．側視画像から抽出した水面位置と PIV 計測結果を対応づけ，水面変動の時空間特性の形状・間隔依存性とその発生機構を明らかにする．

２．実験方法

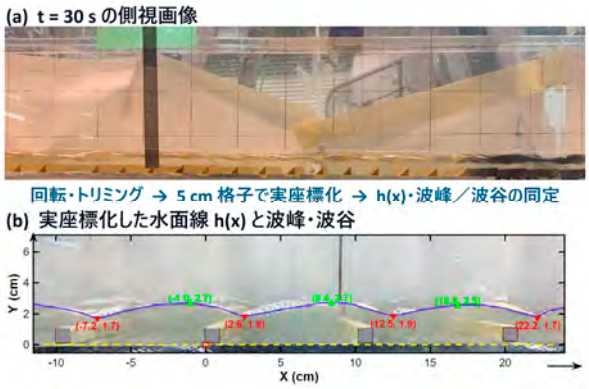
図−1 に実験水路および水面・流速計測系を示す．実験には長さ 4.0 m，幅 0.20 m の可変勾配直線水路を用い，入口から 1.0 m を助走区間，その下流を桟粗度区間とした．水路床には高さ $d = 10$ mm の直角二等辺三角柱桟および四角柱桟を流れに直角に設置し，相対桟間隔を λ/d=3, 5, 10 とした．実験は Fr=2.80, 3.03, 3.92 の浅水射流条件で行い，桟形状，相対桟間隔および Fr の違いによる水面応答を比較した．

水面形は水路側方から撮影した画像を用いて評価した．格子およびスケールを基準として画像上に水面線を描出した．さらに，瞬時水面線の抽出を自動化するため，動画各フレームをグレースケール化し，Gaussian 平滑化，Canny 法によるエッジ検出および輪郭抽出を順に行い，画像上部の連続輪郭を水面候補とする処理を試行した．ただし，反射，気泡に起因する誤検出が残るため，本稿では目視で確認した水面線を基準とし，自動抽出結果は補助的に用いた．

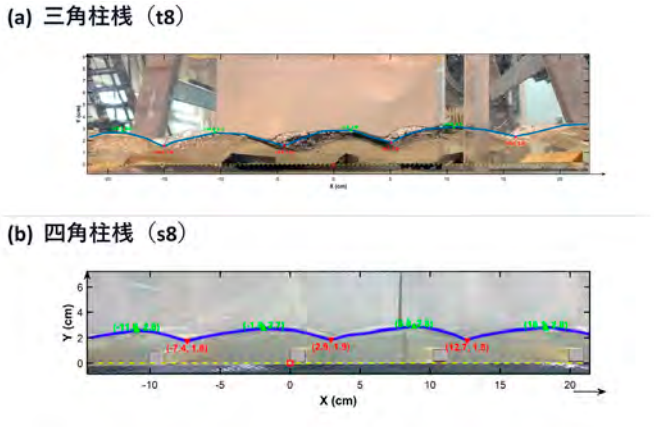
また，水路中央鉛直面にレーザーライトシートを照射し，水路側方から撮影した画像に PIV を適用して，桟背後の剥離域，再循環域および鉛直流を求めた．同一水理条件における水面形と平均流速場を対応づけ，桟形状および Fr の違いが水面応答に及ぼす影響を流れ構造との関係から検討した．



図−1 実験水路，側方からの水面撮影および水面線抽出・PIV 解析の概要



図−2 側視画像に基づく水面線 h(x) の抽出手順および波峰・波谷の同定



図−3 桟形状による水面形と極値位相の比較（$\lambda/d = 10$，Fr = 3.03）：(a) 三角柱桟（t8），(b) 四角柱桟（s8）

Xujian WU, Michio SANJOU, Kazumasa MATSUMOTO
wu.xujian.33y@st.kyoto-u.ac.jp

３．結果と考察

(1) 桟粗度間隔による水面波の形成と波長選択

表−1 に，桟形状 2 種×相対桟間隔 3 条件×水理条件 3 条件の計 18 条件における水面応答を示す．$\lambda/d = 3$では，両形状とも水面変動が小さく，波峰・波谷の判別は困難であった．$\lambda/d = 5$では周期波が現れる一方，三角柱桟の$\mathrm{Fr} = 3.03$では波長が不明瞭となり，$\mathrm{Fr} = 3.92$では$\lambda'/\lambda \approx 2$を示した．$\lambda/d = 10$では両形状・全水理条件で$\lambda'/\lambda \approx 1$となった．波長を判定できた 11 条件中 10 条件が 1:1 の関係を示したことから，桟列は基本的に桟間隔と同じ波長を選択させる周期擾乱として作用する．ただし，三角柱桟の過渡条件では，隣接する水面応答が合成され，一つおきの桟で同位相となる 2λ モードへ遷移する可能性がある．

表−1　清水粗面条件の Fr，Re および水面応答

桟形状	λ/d	$\mathrm{Fr} = 2.80$ $\mathrm{Re} = 10,000$	$Fr = 3.03$ $Re = 12,500$	$\mathrm{Fr} = 3.92$ $\mathrm{Re} = 13,750$
三角柱	3	× 判別不可	× 判別不可	× 判別不可
三角柱	5	○ $\lambda' \approx \lambda$	△ 不明瞭	○ $\lambda' \approx 2\lambda$
三角柱	10	○ $\lambda' \approx \lambda$	○ $\lambda' \approx \lambda$	○ $\lambda' \approx \lambda$
四角柱	3	× 判別不可	× 判別不可	× 判別不可
四角柱	5	○ $\lambda' \approx \lambda$	○ $\lambda' \approx \lambda$	○ $\lambda' \approx \lambda$
四角柱	10	○ $\lambda' \approx \lambda$	○ $\lambda' \approx \lambda$	○ $\lambda' \approx \lambda$

(2) 桟形状による波高と極値位相の差異

$\lambda/d = 5$ に着目すると，桟形状による差が最も明瞭に現れた．四角柱桟では，全水理条件で明瞭な周期波が形成され，$\lambda'/\lambda \approx 1$を示した．これに対し，三角柱桟では，水理条件の変化に伴い　$\lambda'/\lambda \approx 1$，波長不明瞭および$\lambda'/\lambda \approx 2$　の 3 種類の応答が確認された．波高を判定できた条件では，三角柱桟の波高 H_w は 0.7〜1.5 cm，四角柱桟では 0.2〜1.3 cm であった．したがって，中間桟間隔条件では，桟形状が波高だけでなく，明瞭な周期波の形成および波長モードの選択にも関与すると考えられる．

また，**図−3** に示す $\lambda/d = 10$，Fr= 3.03 の代表例では，両形状とも$\lambda' \approx 10$ cmとなり，桟間隔との 1:1 の波長固定を示した．一方，代表波高は三角柱桟で 1.1 cm，四角柱桟で 0.9 cm であった．図示した区間では，波峰・波谷が各桟間のほぼ同じ相対位置に反復し，桟配置に対する位相固定の傾向が認められた．さらに，三角柱桟では波峰が桟の直下流，四角柱桟では直上流に位置した．以上より，周期波が桟間隔に固定された条件においても，桟形状は波高および極値位相に影響する可能性がある．

さらに，水面波形の非対称性を表す指標として，波谷位置 $x_{t,i}$ から下流側波峰位置 $x_{p,i+1}$ までの距離を主要波長 λ' で無次元化した上昇区間比

$$R_a = \frac{x_{p,i+1} - x_{t,i}}{\lambda'}$$

に着目した．一部の代表波形ではR_a が 0.62 前後となり，黄金比の逆数 $(\sqrt{5}-1)/2 \approx 0.618$ に近い値を示した．ただし，この結果は限られた単一時刻の代表画像に基づく初期的な観察であり，普遍的な関係を示すものではない．今後，全実験条件における R_a の平均値およびばらつきを整理するとともに，PIV 計測によって桟形状による剥離・後流構造の違いと水面波形との関係を検証する必要がある．

(3) 気泡巻き込みと水面位相

本実験範囲では，気泡巻き込みは$\lambda/d = 10$の 6 条件でのみ確認され，$\mathrm{Fr} = 2.80$および 3.03 では Few，$\mathrm{Fr} = 3.92$では Much と判定された．気泡は主として波谷から波峰へ向かう上昇波面に分布し，発生位置が水面波の位相に対応した．$\lambda/d = 10$における水面波の波形勾配$S_w = H_w/\lambda'$は，三角柱桟で 0.07，0.11，0.15，四角柱桟で 0.09，0.09，0.13 であり，最も強い水理条件では波形急峻度と気泡量がともに大きかった．気泡なし条件の最大$\mathrm{We} = 210$に対し，気泡あり条件の最小値は 222 であったが，この境界は$\lambda/d = 5$から 10 への変化とも一致する．

４．おわりに

本研究では，浅水射流条件下における桟粗度の形状・間隔と水面応答の関係を検討した．λ/d=3 では波形の判別が困難であったのに対し，λ/d=10 では両形状とも桟間隔と同じ波長をもつ周期波が確認された．また，λ/d=5 では三角柱桟で波長が不明瞭な波形および 2λ モードが現れ，形状差が顕著となった．気泡巻き込みは λ/d=10 でのみ確認され，We 数および波形急峻度との関連が示唆されたが，単一パラメータの効果は特定できなかった．今後は PIV 計測により，剥離・後流構造と水面応答の関係を検証する．

参考文献

1) Leonardi, S., Orlandi, P., Smalley, R. J., Djenidi, L., & Antonia, R. A. (2003). Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall. *Journal of Fluid Mechanics*, *491*, 229-238.

2) Dolcetti, G., Horoshenkov, K. V., Krynkin, A., & Tait, S. J. (2016). Frequency-wavenumber spectrum of the free surface of shallow turbulent flows over a rough boundary. *Physics of Fluids*, *28*(10), 105105.

3) Luo, Q., Dolcetti, G., Stoesser, T., & Tait, S. (2023). Water surface response to turbulent flow over a backward-facing step. Journal of Fluid Mechanics, 966, A18.