

1. はじめに

木曽川の河口から 37 km 地点では、粘性土層の剥離により露出した砂層が局所的に洗掘し、図-1 のような最大洗掘深 20 m の大規模深掘れが発生している。この大規模深掘れの発生により、周辺構造物への影響や生態系バランスの変化が懸念される。また、粘性土層の剥離による局所洗掘は他の沖積河川でも確認されているため、発生・拡大要因の解明が必要である。深掘れ発生・拡大の要因は、①河岸凸部の存在②平面渦③耐侵食性の粘性土層の下流に砂層があることで、固定床から移動床へ遷移し、掃流砂量のバランスが崩れること、とされているが、推測の域を出ず、具体的な解決には至っていない。本研究では、推測されている発生・拡大要因に着目し、PIV 実験をはじめとした模型実験と数値計算を行い具体的な深掘れの発生・拡大要因について検討した。

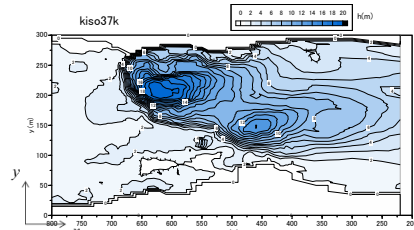


図-1 木曽川河口 37km 地点における河床コンター

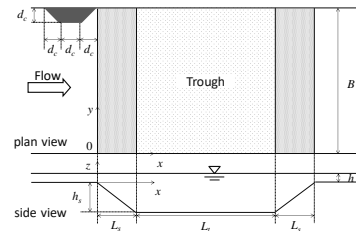


図-2 PIV 実験水路条件

表-1 PIV 実験水理条件

| Case | Discharge Q (L/s) | Water depth h (cm) | Channel Width B (cm) | Mean Velocity $U_m$ (cm/s) | Froude No. Fr | Bed slope I | Step height $h_1$ (cm) | Step Length $L_s$ (cm) | Trough length $L_t$ (cm) | Convex span $d_c$ (cm) |
|------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|---------------|-------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| S3   | 2                 | 2.6                | 30                   | 25.64                      | 0.508         | 0.001       | 3.3                    | 6.0                    | 34                       | 3.0                    |
| NS   |                   |                    |                      |                            |               |             | 3.3                    | 6.0                    | 34                       | -                      |
| SO   |                   |                    |                      |                            |               |             | 0.0                    | 0.0                    | -                        | 3.0                    |

2. 河岸凸部と河床段落ちが存在する流れ構造

(1) 木曽川深掘れの特徴

木曽川の深掘れ発生箇所では左岸と右岸に凸部が張り出しており、深掘れ上流部では表層の粘土層が破壊されはく離されやすい水理条件であることが示唆されている。深掘れ部では大規模な平面渦が発生しており、底層付近でも表層と同程度の流速が発生していることが確認されている。富永らは河岸凸部の影響を排除して、木曽川深掘れ部の模型河床を設置した流速計測を行ったところ、平面渦の形成を確認した<sup>1)</sup>。また、直線水路の片側に淵を設けた実験では、最深部で円筒状の平面渦が発生していることを示した<sup>2)</sup>。したがって、深掘れが片岸に存在することで、平面渦が発生することが明らかとなったが、深掘れの発生要因と、平面渦の役割については不明なままである。そこで、より単純な条件において平面渦が発生するか、また洗掘促進の有無について検討するために、水路底面に段落ちが存在する水路において、段落ち部上流側の側岸に凸部がある条件の下で、流れ構造に関する実験を行った。

(2) PIV 実験

流れ構造の実験にあたり、長さ 7.5 m、幅 0.3 m で勾配 1/1000 の長方形断面開水路において PIV 法により流速を計測した。実験水路は図-2 に示すように、平坦路床から傾斜を有する段落ち部とトラフ部を経て、段落ち部と同じ傾斜の段上がり部を設けている。ケース S3 は、左岸側の段落ち部直前に張り出し長さ 3 cm の台形凸部を設置した。ケース NS は、段落ちだけ

で凸部を設置していない。ケース SO は、段落ちを設けず平坦河床とし、左岸の凸部のみを設置した。実験水理条件は表-1 に示す。x 座標の原点は段落ち開始地点とし、y 座標の原点は右岸、z 座標の原点は段落ち上流端の平坦河床高さとした。

PIV 計測の流れの可視化には、直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3 mm のシート状にしたグリーンレーザー光を開水路水平断面に照射し、水表面からビデオ撮影した。1 回の撮影では段落ち部全体をカバーできないため、上流側と下流側の 2 回に分けて撮影し合成した。

レーザー光の照射位置は、ケース S3 とケース NS では、5 mm 間隔で 11 断面 ( $z = -28 \text{ mm} \sim 22 \text{ mm}$ )、ケース SO では 5 mm, 10 mm, 15 mm の 3 断面とした。この可視化画像は高速度カメラ (Ditect HAS-U1) を用いて 1024×1024 (pixel) の画像を 1/200 s で撮影し、画像計測には FlowExpert (カトウ光研) PIV 解析ソフトを用いて流速ベクトル計測を行った。相互相関法により画像を 24×24 (pixel) の検査領域で解析して、3200 個 16 秒間平均値の平面流速ベクトルデータを得た。

(3) PIV 実験結果

ケース SO の  $z = 0.5 \text{ cm}$  における実験結果を図-3 に示す。流速ベクトル図では変化が局所的であるため、主流速コンターも一緒に示す。凸部の背後で逆流がみられ、 $x = 25 \text{ cm}$  付近で再付着している。凸部の水はね

効果も小さく、主流域の  $x=0\sim 15\text{ cm}$  で弱い加速域が見られる。凸部背後以外は進行方向に流れており、河岸に水制がある場合に見られる流れである。

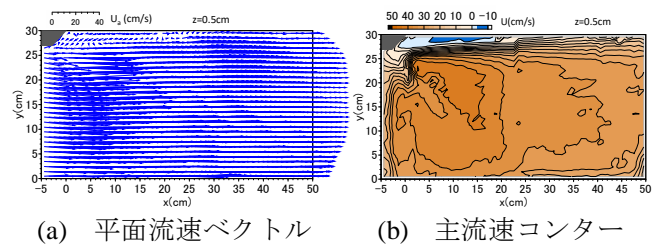
次に、ケース NS の  $z=-2.8\text{ cm}$ 、 $z=-0.3\text{ cm}$  における平面流速ベクトルを図-4 に示す。下層となる  $z=-2.8\text{ cm}$  ではトラフ部の両岸にほぼ左右対称な逆流がみられるが、平面渦の形成には至っていない。再付着点は  $x=30\text{ cm}$  付近で見られ、水路中心部の上流側では平行に逆流が発生している。これより下流では両岸から中央へ集まる流れが見られ、 $z=-0.3\text{ cm}$  に比べても流速が遅く、掃流作用はないことが見込まれる。一方で  $z=-0.3\text{ cm}$  は、段落ち部上流端で中央から両岸に向かう流れが見られるが下流域では流下方向にまっすぐ流れており、逆流は見られない。上層では流下方向に平行な流れのみとなっていた。

ケース S3 の  $z=-2.8\text{ cm}$ 、 $z=2.2\text{ cm}$  における平面流速ベクトルを図-5 に示す。上層、下層ともに左岸側に大きな平面渦が発生している。また、凸部から水路中心部にかけて偏流が発生し、流下に従って放射状に広がっている。ケース SO やケース NS ではこのような流れとならないことから、凸部の下流に段落ちが存在することにより、凸部の水はねによる偏流が深い水深に入ることによって著しく増幅され、大規模平面渦を発生させることが明らかとなった。図-6 にケース S3 の平面渦の中心部に当たる  $x=26.5\text{ cm}$  における主流速の横断分布を代表高さについて示す。  $y=16.5\text{ cm}\sim 29.5\text{ cm}$  の左岸領域では主流速は直線的に減少し、左岸近傍で約  $17\text{ cm/s}$  の逆流となっている。この分布から、主流速は鉛直方向にほとんど変化がなく、2次元的な円筒状の強制渦が発生していることが分かる。木曾川 37 km 地点の深掘れ部でも下層部まで高い流速を維持していることが確認されており、その原因として凸部の存在と段落ち部となるような洗掘形状であるためではないかと推測される。次に段落ち部底面近傍の平均主流速コンターを図-7 に示す。主流速は図-5 でみられる平面渦の外縁に沿って、下流に向かって増大し、 $x=26.5\text{ cm}$  でピークを取って下流に向かい減少している。底面近傍としては大きな値であり、この流れにより掃流力が増大し、洗掘が発生することが予想される。

以上の結果から、河岸凸部と河床段落ちの存在により平面渦が発生し、底面近傍まで高い流速が維持されることが分かった。この作用により、河床洗掘が発生することが予想され、模型実験を行い確認した。

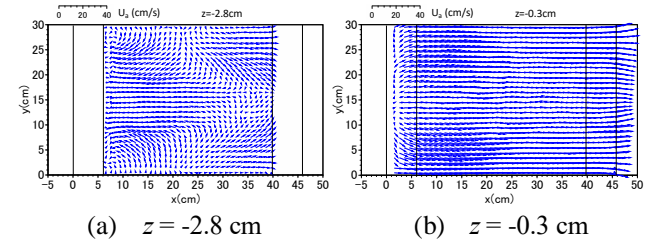
### 3. 局所洗掘と河床段落ち発生要因の検討

まず、深掘れの発生要因として考えられる粘性土層と砂層の境界の存在、河岸凸部の存在および段落ちの存在のうち何が支配要因となるか、深掘れ形成のプロセスを検討した。



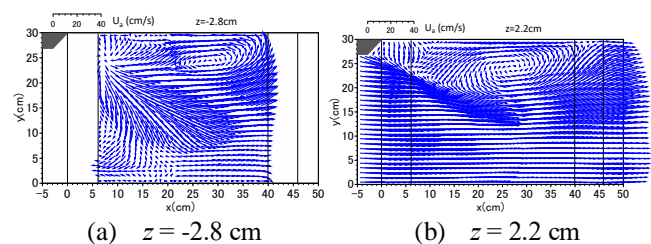
(a) 平面流速ベクトル (b) 主流速コンター

図-3 ケース SO の  $z=0.5\text{ cm}$  における実験結果



(a)  $z=-2.8\text{ cm}$  (b)  $z=-0.3\text{ cm}$

図-4 ケース NS の各高さにおける平面流速ベクトル



(a)  $z=-2.8\text{ cm}$  (b)  $z=2.2\text{ cm}$

図-5 ケース S3 の各高さにおける平面流速ベクトル

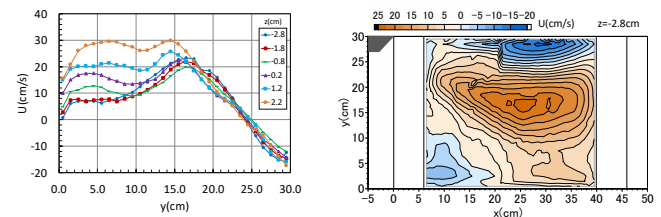


図-6  $x=26.5\text{ cm}$  における主流速横断分布比較 図-7 ケース S3 の  $z=-2.8\text{ cm}$  における主流速コンター

実験水路は長さ  $14\text{ m}$ 、幅  $B=59.3\text{ cm}$  の勾配可変型開水路を使用し、水路勾配を  $I=1/500$  とした。実験模型は図-8 のようにトラフ部まで凸部が張り出した状態である。各座標原点は 2 と同様である。水路模型条件を表-2 に示す。d5 は段落ちのみ、s10 は凸部のみ、none は凸部も段落ちもないケースとした。段落ちがある場合はトラフ部のみ移動床で、ない場合は  $x=0\text{ cm}\sim 70\text{ cm}$  が移動床となり、平均粒径  $d_m=0.611\text{ mm}$  の一様砂を厚さ  $6\text{ cm}$  で敷き詰め実験を行った。水理条件は表-3 の該当するケースにあたる。

図-9 に河床高コンターを示す。d5 はほとんど河床変動がみられない。PIV 実験におけるケース NS の底面では、段落ち部をみの場合、底層の流速が遅く掃流作用がほとんどないことが見込まれていたが、本実験の結果からも掃流作用がないことが明らかとなった。s10 では左岸側で最大洗堀深は  $34\text{ mm}$  となったが、右岸側も洗堀が進行しており、全体に河床

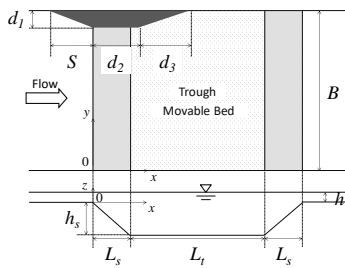


図-8 実験水路条件

が低下した。d5 よりも大幅に河床が低下していることから、凸部が存在する方が掃流作用があることが明らかとなった。しかし、局所洗掘は発生しなかったため、洗掘発生には段落ちも必要である。現地では右岸側で粘性土層が広がっていることから、耐侵食性の粘性土層が存在すると河床低下は進行しないと推測される。

none をみると、固定床から砂層の境界でやや段落ちが発生している。よって、耐侵食性となる固定床から移動しやすい砂層へ移り変わることで掃流バランスが崩れ、洗掘が進行することがいえる。ただし、s10 では河床低下がより進行していることから、凸部を設置した方が河床低下の進行は速くなる。

以上の結果から、粘性土層から砂層の境界の発生と左岸の凸部の影響により河床段落ちが発生することが明らかとなり、この2つの作用により局所洗掘が発生するのではないかと推測される。

#### 4. 現地を近似した凸部模型と河床段落ちの実験

##### (1) 現地河道を近似した河岸凸部と河床段落ちの移動床実験

凸部をより現地に近づけた上で、河岸凸部と河床段落ちが存在する場合の河床変動実験を行い、凸部形状や流量による影響について検討した。図-8 と表-2 のように、凸部の上流側の張り出し角度を変化させて張り出し角度が急なものをケース s10、緩やかなものをケース s18 として河床変動を見た。流量は2パターン設定し、実験は表-3 の s10q11.4h5, s18q11.4h5, s10q9.6h4, s18q9.6h4 の4ケース行った。

図-10 に各ケースの河床高コンターを示す。s10q9.6h4 では段落ち後すぐに水路中心部から左岸側にかけて最大洗掘深は 39 mm の楕円型の局所的な洗掘(段落ち部の河床高さは-50 mm)が発生した。最大洗掘位置は、図-7 を参考にすると、最大流速の位置に対応するのではなく、流速が下流に向かい増加する、流速勾配の大きい位置に対応している。凸部角度が小さい s18q9.6h4 も左岸側で洗掘しているが、洗掘開始位置が s10q9.6h4 よりも下流側に位置し、最大洗掘深は 33 mm と小さくなっている。

流量を増加させた s10q11.4h5 は、最大洗掘深が 44

表-2 水路模型条件

| case          | Channel Width B (cm) | Step height h <sub>s</sub> (cm) | Step Length L <sub>s</sub> (cm) | Trough length L <sub>t</sub> (cm) | Convex span S (cm) | Convex span d <sub>1</sub> (cm) | Convex span d <sub>2</sub> (cm) | Convex span d <sub>3</sub> (cm) |
|---------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| d5            | 59.3                 | 5                               | 10                              | 60                                | -                  | -                               | -                               | -                               |
| s10           |                      | -                               | -                               | -                                 | 10                 | 5                               | 16                              | 18                              |
| none          |                      | -                               | -                               | -                                 | -                  | -                               | -                               | -                               |
| s10q11.4h5    | 30                   | 5                               | 10                              | 60                                | 10                 | 5                               | 16                              | 18                              |
| s18q11.4h5    |                      | 5                               | 10                              | 60                                | 18                 | 5                               | 16                              | 18                              |
| s10q9.6h4     |                      | 5                               | 10                              | 60                                | 10                 | 5                               | 16                              | 18                              |
| s18q9.6h4     |                      | 5                               | 10                              | 60                                | 18                 | 5                               | 16                              | 18                              |
| s6q2.5h2.8    | 30                   | 3.5                             | 7                               | 42                                | 6                  | 3.5                             | 12                              | 12.5                            |
| s12.5q2.5h2.8 |                      | 3.5                             | 7                               | 42                                | 12.5               | 3.5                             | 12                              | 12.5                            |
| s6q3.1h3.8    |                      | 3.5                             | 7                               | 42                                | 6                  | 3.5                             | 12                              | 12.5                            |
| s12.5q3.1h3.8 |                      | 3.5                             | 7                               | 42                                | 12.5               | 3.5                             | 12                              | 12.5                            |

表-3 水理条件

| case          | Discharge Q (L/s) | Water depth h (cm) | Mean Velocity U <sub>m</sub> (cm/s) | Froude No. Fr | Bed slope I |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|---------------|-------------|
| d5            | 9.6               | 4                  | 40.47                               | 0.646         | 0.002       |
| s10           |                   |                    |                                     |               |             |
| none          |                   |                    |                                     |               |             |
| s10q11.4h5    | 11.4              | 5                  | 38.45                               | 0.549         |             |
| s18q11.4h5    | 11.4              | 5                  | 38.45                               | 0.549         |             |
| s10q9.6h4     | 9.6               | 4                  | 40.47                               | 0.646         |             |
| s18q9.6h4     | 9.6               | 4                  | 40.47                               | 0.646         |             |
| s6q2.5h2.8    | 2.5               | 2.8                | 29.76                               | 0.568         | 0.001       |
| s12.5q2.5h2.8 | 2.5               | 2.8                | 29.76                               | 0.568         |             |
| s6q3.1h3.8    | 3.1               | 3.8                | 27.19                               | 0.446         |             |
| s12.5q3.1h3.8 | 3.1               | 3.8                | 27.19                               | 0.446         |             |

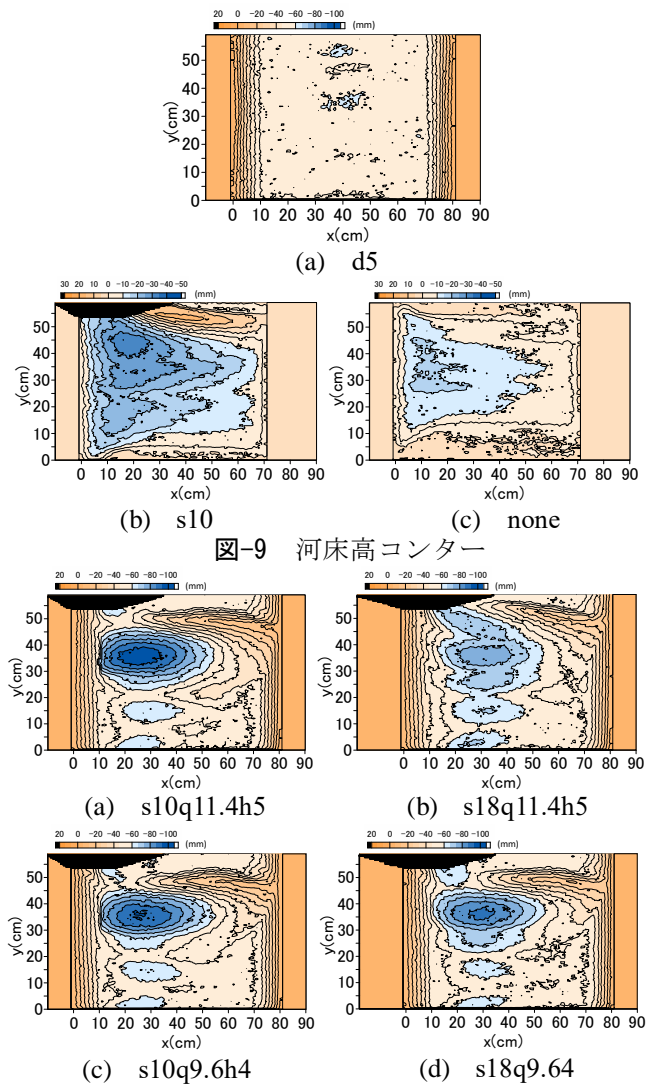


図-10 河床高コンター

mm と洗掘が進行したのみで流量による形状の変化は見られない。一方、凸部角度が小さいと流量増加により洗掘が減少し、全体に河床が低下した。



(2) 現地を近似した河岸凸部と河床段落ちの流れ構造の把握

(1)において、流量、凸部の張り出し角度が異なることで洗掘形状に違いが出た。流れ構造が異なり洗掘形状も変化した可能性があることから、PIV 実験を行った。実験水路と計測方法、解析条件は2と同様で、水路模型は図-8、表-2 の s6q3.1h3.8, s12.5q3.1h3.8, s6q2.5h2.8, s12.5q2.5h2.8 とした。水理条件は表-3 に示している。移動床実験と全く相似の条件ではないが、流量と凸部の違いによる流れ構造の違いを把握した。レーザーは開水路水平断面に照射した。

図-11 に各ケースの底面近傍と水面近傍の平面流速ベクトルを示す。s6q2.5h2.8 では底面近傍において左岸下流で平面渦が発生している。偏流は水路中心から右岸に向けて発生しており、それより左岸では渦を巻くように逆流となっている。水面近傍では、偏流は凸部上流の張り出しの延長線上に発生しており、平面渦はより明確に左岸いっぱいには発生している。凸部角度が小さい s12.5q2.5h2.8 の底面近傍では偏流発生位置は左岸の下流に移っている。凸部の張り出し角度が違ふことで偏流の発生位置が異なり、局所洗掘発生位置が異なったものと考えられる。下流左岸では、水路中心部から左岸に向けて弧を描いて流れているが、その後は逆流のみで順流とはならず平面渦とはならなかった。一方で水面近傍になると左岸に平面渦が形成される。偏流は s6q2.5h2.8 ほど集中していないが、凸部上流張り出し角度が弱まったためであると考えられる。

流量を増加させた場合をみると、s6q3.1h3.8 では s6q2.5h2.8 と大きな変化は見られない。角度の小さい s12.5q3.1h3.8 では底面に複雑な流れとなっており、上流側では偏流は発生せず、兩岸付近では壁面から水路中心に向かうような逆流、水路中心付近では水路中心部から兩岸に向かうような流れとなっている。凸部背後では  $x = 24.5 \text{ cm}$  を中心として小さな渦がみられるが、左岸側で大規模な平面渦は形成されておらず、他ケースとは大きく異なる流れとなった。水面近傍になると弱い平面渦が発生する。流量が大きく、凸部の張り出し角度が緩やかであると、底面近傍では偏流や大規模平面渦が発生せずに複雑な流れ構造となり、洗掘へと結びつかなかったのではないかと推測される。

### 5. まとめ

本研究では河岸凸部と河床段落ちに着目して実験を行った結果、大規模な平面渦と偏流を形成すること、そして一定流量を超えず、凸部上流張り出し角度が大きい際に局所洗掘が発生することが明らかとなった。本研究で得られた知見から、以下のような深掘れ形成のメカニズムが推測される。

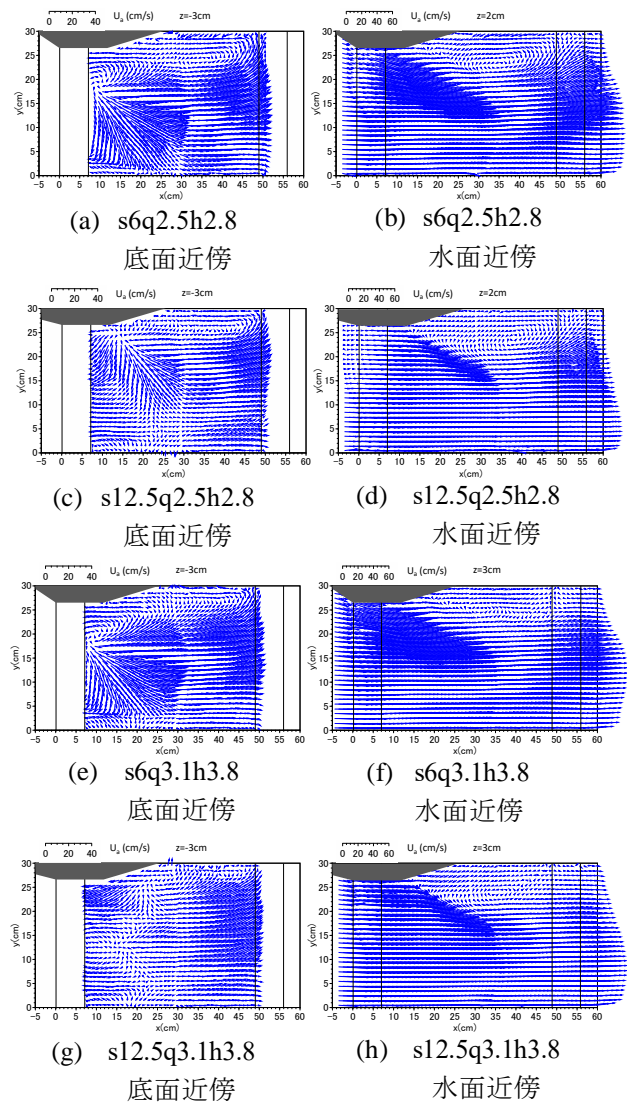


図-11 各ケースにおける平面流速ベクトル

- 1) 出水と左岸凸部の影響で底面せん断力が大きくなり粘性土層が上流側までく離する
- 2) 耐侵食性の粘性土層から砂層の境界が発生し、左岸凸部と砂層の侵食により段落ちが発生
- 3) 平面渦が発生し底層まで大きい流速を保つことで掃流力が増大し、偏流が下流の深い水深に入ること著しく増幅され局所洗掘が進行する

しかし、凸部と段落ちがある場合に平面渦と偏流が発生する理由、洗掘箇所における平面渦の維持に関しては具体的に解明できていないため、条件を変えた実験と3次元数値計算によるさらなる検討が必要となる。

### 参考文献

- 1) 富永晃宏, 佐々直彦, 原悠二, 久野由雅: 木曾川における大規模深掘れ周辺の3次元流れ構造, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I\_643-I\_648, 2018.
- 2) 富永晃宏, 橋本直彦, 松本大三, 島田譲治: 片側に淵を有する直線河道の3次元流れ構造, 応用力学論文集, Vol.10, pp.825-832, 2007.