

二次元ステップ上の流れ

The open channel flow around two-dimensional steps

徳山高専 正員 佐賀孝徳
徳山高専 正員 大成博文
山口大学 正員 斎藤 隆

1. はじめに

二次元ステップ上の流れを基本形式とする流れは、実河川の河床波上の流れ、水制近傍の流れなど水工学上数多くみられるほか、機械、航空、化学工学など多方面の分野においても多く存在している。この二次元ステップ上の流れは、河川工学上重要な河床波上の浮遊砂の発生機構、掃流砂の形成機構、二次元河床波から三次元河床波への発達機構を解明する上で重要な現象であり、さらには基本的な粗面の抵抗則にも関わる重要な課題である。一方、機械工学、熱工学においても、それは、粗度の作り出す乱流促進効果により熱伝達率の向上、剥離防止、拡散率向上などを可能とする重要な工学的流れである。

ところが、二次元ステップ上の流れについては、水工学分野において足立¹⁾・栗原²⁾・椿³⁾によって粗度の配置形状による抵抗則の問題として検討がなされているが、その組織構造に関する研究についてはほとんど行われていない。二次元ステップの一形態と考えられる二次元河床波上の流れの組織構造に関する研究については、その必要性から近年数多く行われてきておりクレスト下流部の剥離渦、再付着点位置の特性などかなり解明がなされている^{4) 5) 6)}。しかしながら二次元ステップ上の流れにおいては間欠的に起こる上昇流の形成機構を総合的に説明できる流れの組織構造を確立するまでには至っていないのが現状である。本研究では、二次元粗度のためにこれまであまり注目されていなかった流れの三次元性を考慮しながら二次元ステップ上の流れの組織構造について検討を行った。二次元ステップ上の流れをより三次元的に把握するために、紫外線ランプによる平面視、レーザースリット法による縦断面視、横断面視の可視化が行われた。その結果、二次元ステップ近傍の渦構造がかなり明らかとなり、二次元ステップ上の流れに間欠的にみられる上昇流の形成機構についてもかなり解明がなされた。

2. 実験装置および実験方法

実験は、9.5mm角の真ちゅう棒を流れ方向にピッチ比1:10で敷き詰めた棧粗度の床面を持つ開水路（長さ10m 幅60cm、高さ15cm、水路床勾配1/1000）で行われた。実験水路の概略が図1に示されている。実験方法には、時間平均的な流れ場を把握するために平均流速の計測と流れ場の瞬間構造を時空間的に把握するために3つの可視化法が適用された。流速計測には、前方散乱方式のレーザ流速計が用いられた。可視化には、Arレーザを用いた縦・横断面視法、さらには蛍光染料注入法による水路床近傍の平面視が行われ、それらステップ近傍の流況がビデオカメラによって連続的に撮影された。可視化法の詳細は、文献^{7) 8)}にあり、ここでは省略する。

本実験条件が、表1に示されている。

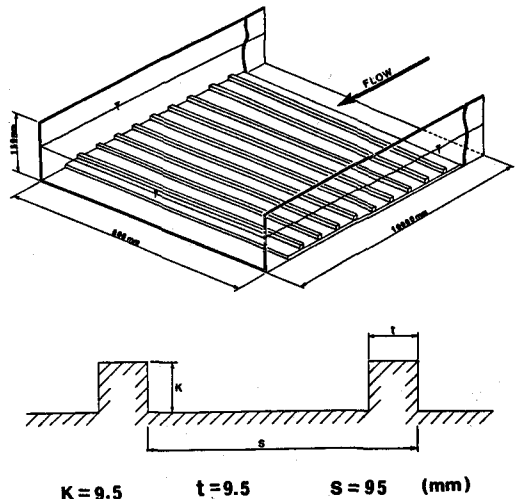


図1. 実験装置

表1. 実験条件

Case	U _{max}	H	Re = $\frac{U_{max} \cdot H}{\nu}$
A	2.5	8.1	1300
B	5.9	9.1	3500
C	9.0	9.7	5000
D	11.4	10.1	8000

3. 二次元ステップ近傍の三次元流況

3.1 平均流速分布特性

図2に、Re数が3500、5000、8000の場合の平均流速分布が示されており、同時に計測断面の位置も、図中に示されている。この図の縦軸は水深 H 、横軸は最大流速 U_{max} でそれぞれ無次元化されている。これらの図より断面Aにおいては壁近くの速度勾配が粗度上のそれに比べて緩やかな傾向を示しており、さらに断面Bにおいても同様の傾向が認められる。ところが粗度上の断面C、D、Eにおいては、いずれも速度勾配がより急であることから局所的にせん断力が大きくなる傾向を示していると思われる。ところが、断面Fでは、粗度上よりも速度勾配がより緩やかとなり、断面Aの速度分布形に近づく傾向が認められる。この場合Re数の違いによる流速分布特性の相違はないようである。また、壁から粗度高さの2倍程度離れた領域では、長周期の速度変動のため、平均時間を長くとり必要性が生じた。このことは、長周期の流速変動を引き起こす組織構造の存在を示唆するものである。

3.2 流れの平面形象

写真1には、二次元ステップ上の流れを水表面方向から撮影された可視化写真の一例が示されている。流れ方向は、右から左であり、この写真から壁近くに注入されたトレーサーによって、粗度近傍の組織構造の存在が明らかである。注目すべき点は、粗度を乗り越える現象が横断方向に一樣ではなく、ほぼ一定の間隔で起きている。また、個々の縦筋(streak)の長さは、粗度間の長さほどであるが、それが集まって大規模化して2、3の粗度にまたがるような場合も存在している。その大規模な縦筋の間では、高速流体の入り込みの結果生ずると思われるような可視化形象も観察された。さらに粗度前部のよどみ領域、粗度後部の後流域の形象が写真2に可視化されている。これらの領域においても組織構造は横断方向に一樣でないことが明らかである。これらの粗度上あるいは前後の組織構造の形象をビデオ画像で詳しく観察すると、それらが横方向に揺動したり新しく形成されているよう

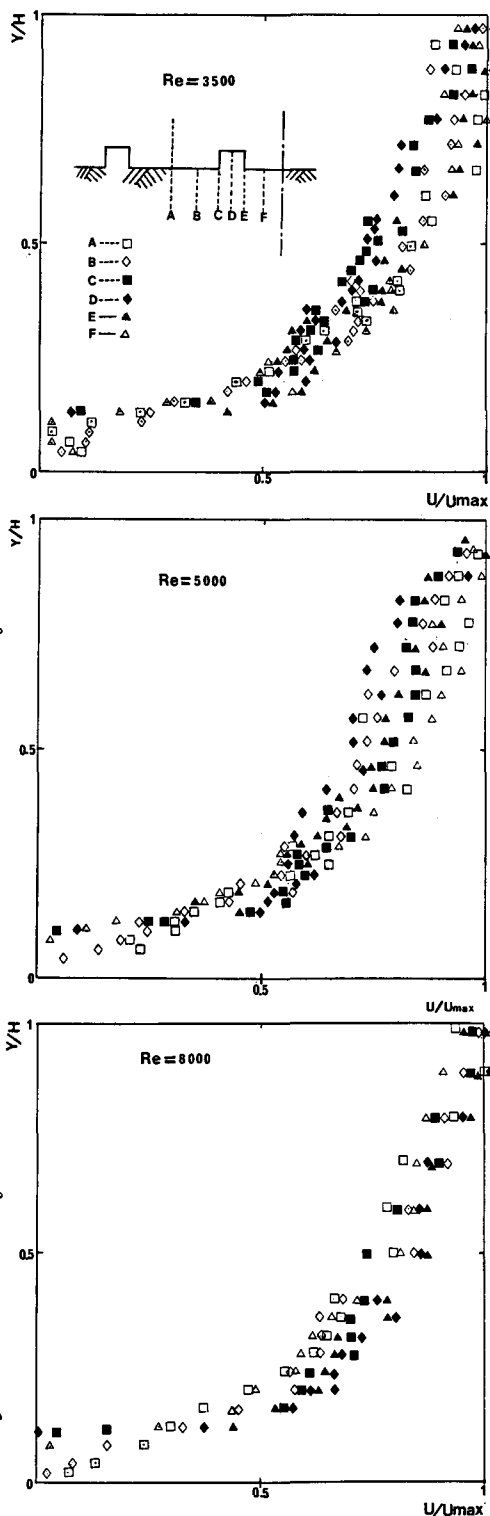


図2. 平均流速分布 CaseBCD

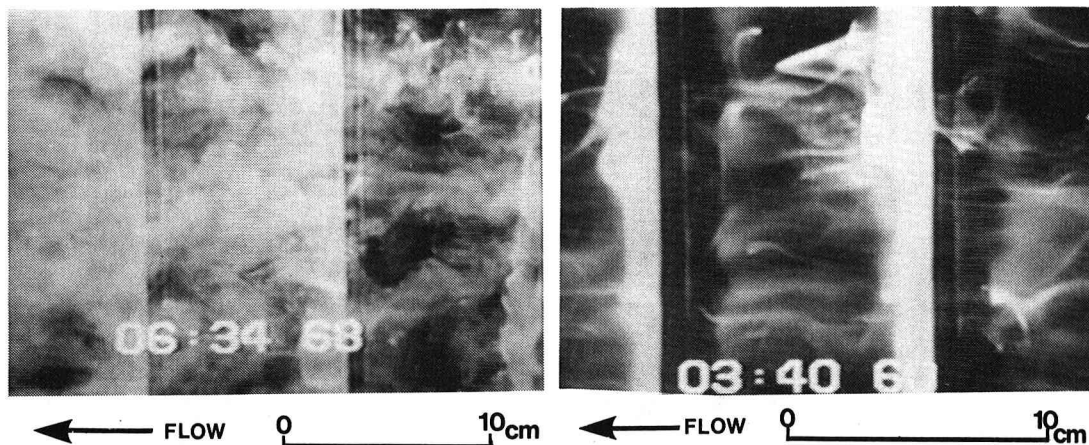


写真1. 二次元ステップ上の流れ（平面視）CaseB 写真2. 二次元ステップ上の流れ（平面視）CaseA

すが詳しく観察される。特に粗度を乗り越えてゆく現象については、宇民ら⁹⁾が堰前部で観察した挙動に類似している。写真3には、前写真と同様の条件における平面形象の連続写真が示されている。各写真の撮影間隔は1秒であり、写真の下側には、それを示す時刻が最小単位1/100秒で同時にスーパーインポーズされて示されている。ここで注目する点は、右上部の形象の連続的な挙動である。写真①で後流域より伸びた2本のstreakは写真②で横断方向に広がりながら流下方向へ発達する。写真③においては、さらにstreakが横方向に広がって、その間に高速流体の入り込みを示唆する黒く写ったV[∞]形象が観察される。そして④,⑤,⑥,⑦と時間が経過するにつれてそのV[∞]領域の両横のstreakが高速流体の入り込んだV[∞]領域を覆い隠すように侵入してゆくことが観察される。それにともなって、先に左右に離れるように進んでいたstreakが逆に近づいてゆくの観察される。(写真③⑨⑩中の矢印)このような一連の挙動は、著者らが滑面開水路乱流の壁面近傍で観察した鱗形状⁷⁾の挙動と非常に類似しているように思われる。以上のような平面形象の特徴から、二次元ステップ上の流れの組織構造は、非常に三次元性に富んでいると言える。

3.3 流れの縦断面形象

写真4には、二次元ステップ近傍が縦断面視された際の典型的な流況が示されている。No. ①, ③の写真には、粗度頂部より剥離渦が発生し、それが下流方向へ移流している様子が示されている。この剥離渦の発生周期は、図3に示されるように約1秒前後であり、それは二次元河床波上の発生周期¹⁾とほぼ等しい値を示している。また、このような現象とは全く逆に剥離渦が存在しないままに、粗度後流域のトレーサーが持ち上げられるような現象も頻繁に観察された。(写真No. ②, ④)この上昇機構の発生周期は、剥離渦の発生周期のおよそ数倍の値を示した。これは、粗度前部からの上昇流が形成される場合として観察され、その際剥離渦が形成されないのは、低速流体の通過によって粗度後端の速度勾配がほとんど無くなったためと考えられる。この間欠的な上昇流の形成には、前述の粗度を乗り越えてゆくstreaksの横断方向への揺動が重要な寄与をなしているように思われる。また、上昇流が形成される際には、粗度前部の淀み領域に横渦がほとんど観察されないことが特徴的である。このことは、上昇流の形成に横渦が重要な役割を果たしていないことを示唆している。

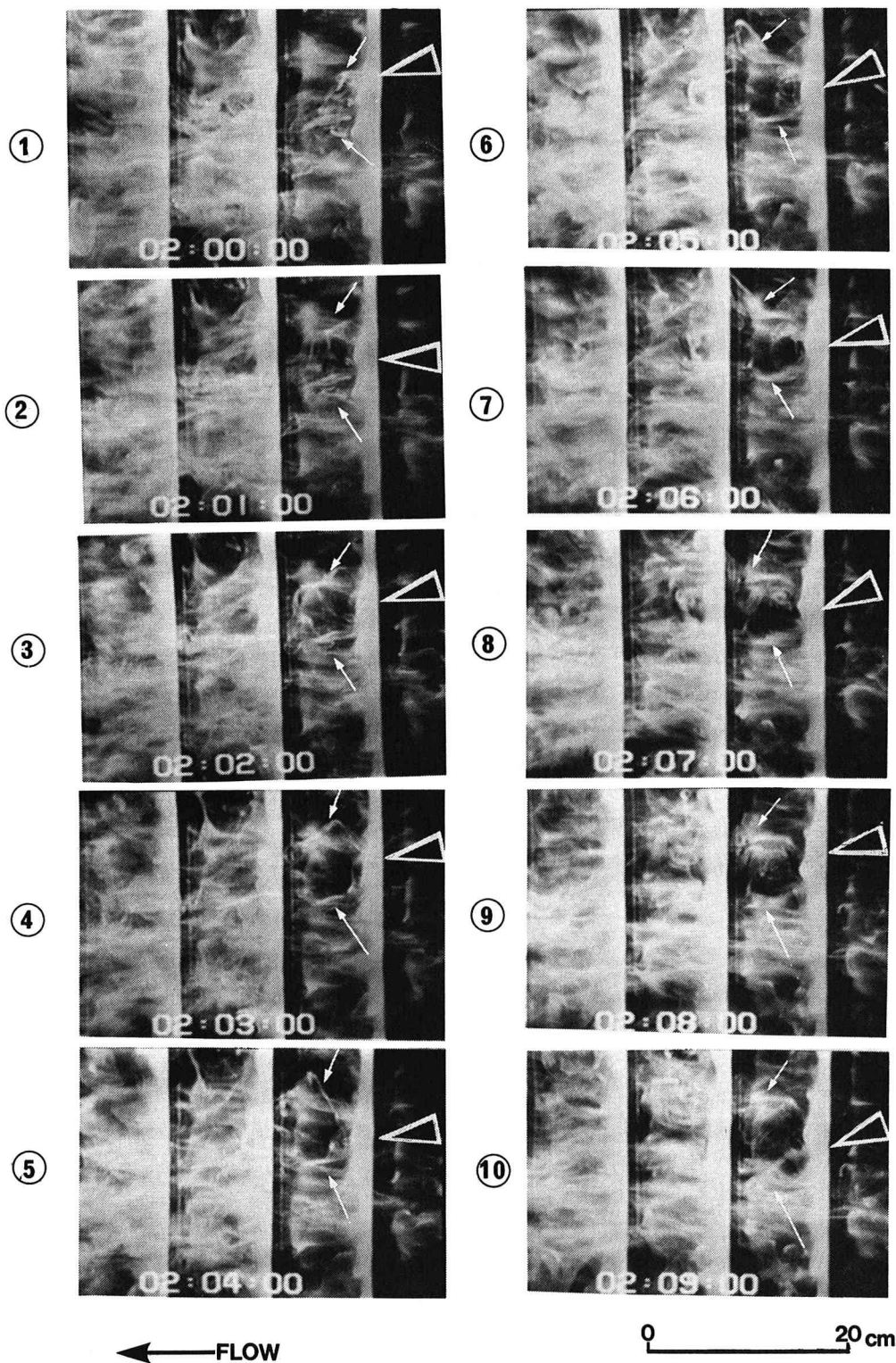
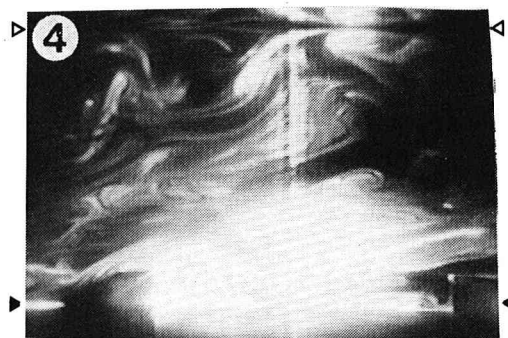
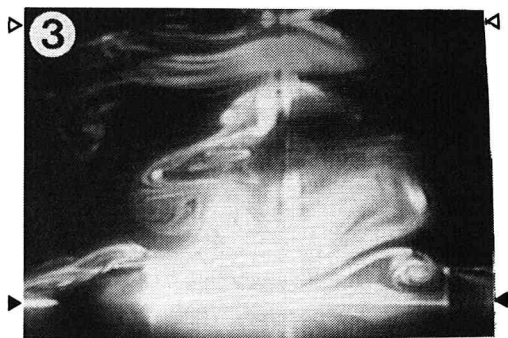
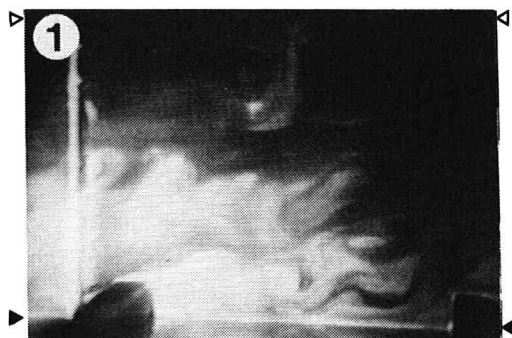


写真3. 二次元ステップ上の流れの連続写真（平面視） CaseA



case B

case A

写真4. 二次元ステップ上の流れ (縦断面視)

3.4 流れの横断面形象

写真5には、断面Dでの横断面形象が示されている。▷◁ water surface
流れ方向は、写真面の向こうから手前である。これより多数の縦渦の形象が粗度近くに形成され、これらの縦渦はビデオの連続画像より滑面上に存在する縦渦⁽⁴⁾と同様に揺動や、複合を繰り返していることが観察された。粗度近くの縦渦の特徴は、比較的規模が小さく、さらにそれが短い時間経過とともに消失することである。このことは、粗度前端部から上昇流が間欠的に発生していることを示唆するものである。

3.5 二次元ステップ上の上昇流の形成機構

以上の平面視、縦断面視、横断面視から得られた結果を総合して粗度近くの間欠的な上昇流の形成機構について以下のような考察がなされた。図4には、粗度近くの上昇流の形成機構に関する概念図が示されている。図中の渦①は、粗度後端より発生する剥離渦であり、それが斜め下流方向に降下し床面に到達した渦を渦②として示している。渦①によって運ばれた高速の流体塊は壁面に到達後四方に広がってゆき、そのすぐ下流には粗度があることから横断方

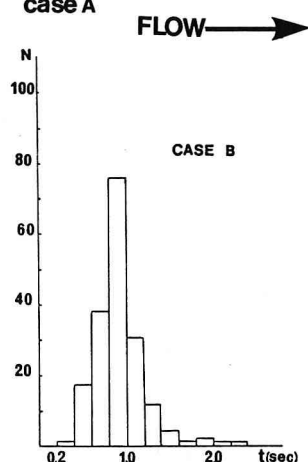


図3. 剥離渦の発生周期 Case2



case B

0 5 cm

写真5. 二次元ステップ上の流れ (横断面視 D断面)

向への流体塊の移動が顕著となってゆく。その結果、粗度前面の横渦③は、渦②によって押され、中央部で細くなり、さらにそれが横断方向に移動する。また、高速流体の到達面aを上部から覆い隠すように高速流体の入り込みによって二次的に形成されたとと思われる渦④が発生する。さらにそれらが粗度を乗り越える上昇流へと発達してゆくようである。この渦④と横断面視で観察される縦渦との詳細な関係については、今後検討してゆくつもりである。

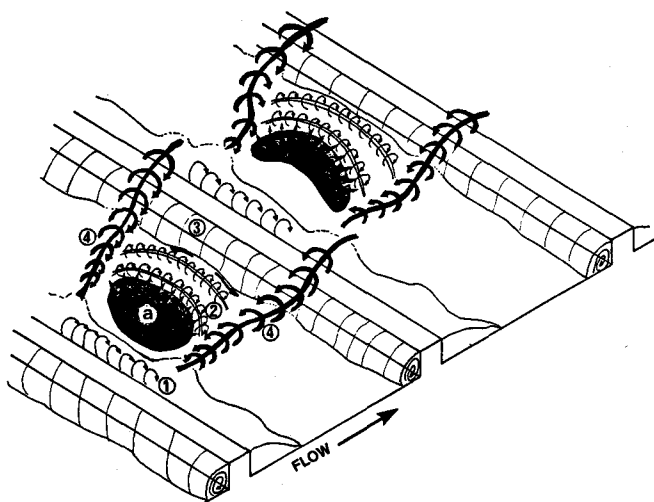


図4. 二次元ステップ上の上昇流の形成機構

4. おわりに

二次元ステップ上の流れの組織構造が、3種類の可視化法を用いて検討された。その結果、二次元ステップ上の流れの特徴的な構造が明かとなった。とくに、二次元の境界条件にもかかわらず三次元性が顕著であること、さらにはこれまで不明とされていた間欠的な上昇流の形成機構についても若干の考察がなされた。本研究の遂行にあたり文部省科学研究費の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 足立昭平：人工粗度の実験的研究、土木学会論文集104号、1964.
- 2) 栗原道徳：粗滑遷移領域における管流の抵抗法則について、九大流研報告、第7巻3号、1951.
- 3) 椿東一郎：二次元粗度の流体抵抗について、山口大学工学部学報第10巻1号、1959.
- 4) 広末真宏、榊永善文、吉川秀夫：河床波上の組織渦に関する研究、第41回年次学術講演会概要集、1986.
- 5) 藤田正治、芦田和男、向井健、藤坂賢治：河床波上の粒子の浮遊運動、第41回年次学術講演会概要集、1986.
- 6) 福津家久、中川博次、天野邦彦：開水路段落ちにおける剝離流の乱流構造に関する研究、第30回水理講演会論文集、1986.
- 7) 大成博文、佐賀孝徳、山本恭子、斎藤隆：壁面領域内乱流構造の比較可視化、流れの可視化Vol.4, No.12, 1984.
- 8) 大成博文、佐賀孝徳、斎藤隆：開水路乱流内層の縦渦構造、土木学会論文集 第363号/-4、1985.
- 9) 宇民正、上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究、京大防災研究所年報第19号B、1976.