

固定床の等流における流れの安定性

新潟大学大学院自然科学研究科
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
学生会員
正会員

○齊藤 浩輝
茂木 大知
安田 浩保

1. はじめに

開水路の流れの基本状態は等流である。等流は一様の水路幅かつ一様の水路勾配の水路において水深と流速がどの地点でも同一の流れの状態を指す¹⁾。等流の成立条件について記述した残存する最も古い資料は16世紀にダヴィンチが残したものとされる。その後、19世紀にベランジェが水の自重と底面の摩擦力が釣り合うことにより水深と流速がどの地点でも同一となることを初めて理論的に説明した。この理論では、水路の左右壁面の摩擦による影響など、横断方向の運動を考慮していないため、等流は1次元的な流れと言える。現在の水理学の教科書の記述の本質は当時と同様であり、水深に比べて水路幅が2オーダーほど大きくないいわゆる矩形幅広の水路の2次元的な流れの把握を前提としつつも、底面の摩擦力のみを対象とすることが一般的である。

図-1に示すのは、正式な成果としては未発表であるが著者が所属する研究グループで行った、模型水路における等流条件での表面流速測定の結果である。この図から、等流条件における表面流速は2次元的に分布していることがわかる。水路幅と底面勾配が一様の水路において、流速に空間分布があるということは、水深にも空間分布が存在すると考えられる。また、ごく近年、測定技術の飛躍的な発展を背景として、少なくとも移動床水理においては、水深によって水面の変動の大きさが変化することが指摘されている²⁾。

これらのことは、水路幅と底面勾配が一様の水路において、1次元的な流れである等流が常に成立するとは限らず、水理条件次第では等流と見做せない規模で水面が空間的にも時間的にも変動する2次元的な流れに変化する可能性を示唆する。つまり、現在の常識で考えられているよりも開水路の流れの基本状態である等流が成立する条件が限定的である可能性がある。

著者の知る限り、等流が成立する条件を疑問視した研究は存在しないようであり、現時点では、固定床においても水路幅と底面勾配が一様の水路においてさえ等流が成立しない場合があるかどうかは不明である。本研究では、固定床模型水路で従来の等流条件を与えた流れにおいて、水面がどれほど変動するのかを調べ、定量化した。

2. 模型実験

本研究では、固定床模型水路での等流条件における流れを対象とし、水面位と底面位を測定するため以下の実験を行った。

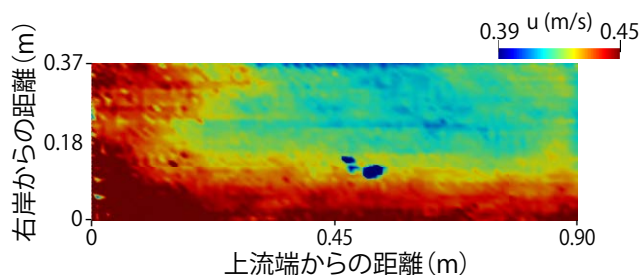


図-1 PTVにより得られた等流条件での表面流速

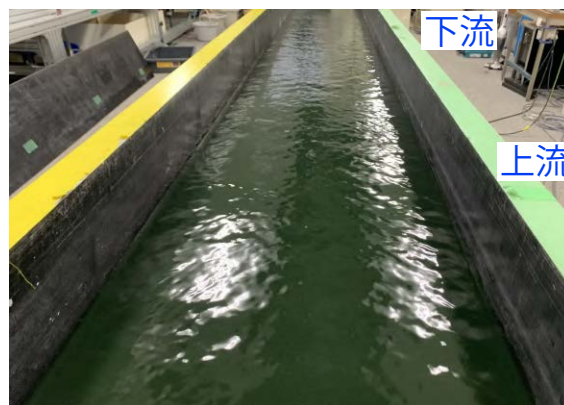


図-2 通水後の水面の様子

(1) 実験方法

実験では、全長12 m、水路幅45 cm、勾配1/100の直線の単矩形断面水路を用いた。通水時の水深を測定装置の測定可能な水深にするため、水路の底面には、厚さ0.14 cm、幅45 cmの黒色フェルトを流下方向に約5 m貼り付けた。水理条件は単列砂州の発生条件となるように川幅水深比を23.2とした³⁾。このときの流量は、1.7 L/sであった。通水中の底面には、図-2に示すような水面の揺らぎが見られた。

測定には、水面と底面を高密度に測定できるStream Tomography(ST)⁴⁾を用いた。フェルトを貼った区間での平均水深を得るために、STの台車を流下方向に動かしながら平面的に水面位と底面位を測定する平面測定を4回行った。その後、任意の横断面での水面変動を調べるために、STの台車を固定し20秒間水面位を測定する変動測定を5回行った。

(2) 測定結果

平面測定により得られた底面位は4回の測定を通して平坦な形状が得られた。一方で、水面位は全ての測定において、上流端から460 cmあたりで水面が盛り上がっていることが確認された。これは、フェルトの下流端によ

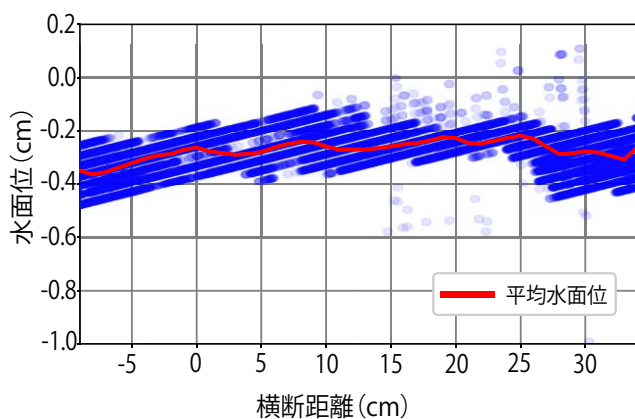


図-3 変動測定の結果

る底面の形状変化が原因と考えられる。そのため、フェルトの上・下流端の影響が少ないと考えられる $x = 20$ cm から $x = 400$ cm の区間において、測定された底面位と水面位のそれぞれの平均値をとり、その差から平均水深 h を算出した。 $h = 0.77$ cm であった。

図-3 は、 $x = 148$ cm での横断面の変動測定の結果である。横軸は横断距離、縦軸は水面位である。5 回の測定により得られた水面位を青色の点として描画濃度 10 % で描画している。青色の濃淡で、その値が測定された回数が多いか少ないかが分かり、色が濃いほど水面位がその値を取ることが多いと言える。青点が斜めの縞模様のようにになっているのは、ST の測定周波数の影響と考えられる。また、赤線は、横断方向に 1 cm の間隔で区切り、その区間内にプロットされている水面位の平均値を算出したものである。この図から、水面位は水深方向にある幅を持って変動していることがわかる。また、若干ではあるが、平均水面位は直線にはならず、水路中央付近が高くなっている。これは、水面位に空間的な変化があることを示す。

3. 固定床水路の等流における流れの安定性

前章では、変動測定の結果から水面位がある幅をもって変動していること、平均水面位に空間的な変化があることがわかった。そこで、水面位の変動のばらつきのおおきさとその空間的な変化を調べるため、変動測定で得られた測定値と平均水面位から横断方向に標準偏差を算出した。

図-4 は、図-3 の各区間における水面位の標準偏差を示す。横軸は横断距離、縦軸は標準偏差である。標準偏差の最大値は $y = 32.0$ cm で $s = 0.062$ cm、最小値は $y = 24.0$ cm で $s = 0.008$ cm であった。標準偏差は横断方向に変化しており、水路壁面付近が大きく、水路中央付近が小さい値をとった。水面位の変動が壁面付近で大きいのは、壁面が与える擾乱によるものと推測される。また、標準偏差を平面測定で得られた平均水深と比較すると、水面位の測定値が平均水深 h の数%の大きさで変動しているということがわかる。これらのことから、固定床において等流条件を与えた流れが、その条件によ

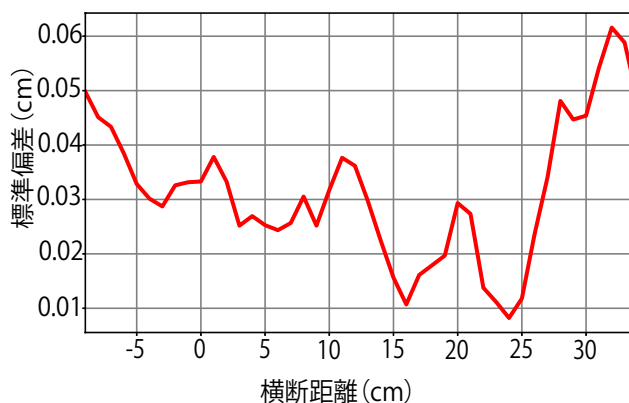


図-4 水面位の標準偏差

ては水深方向の運動だけでなく、水路幅方向の運動も考慮すべき 2 次元的な流れになることを示唆する。

4. おわりに

本研究では、水路幅と底面勾配が一樣な固定床水路において、従来からの等流条件を与えた流れの水面の変動について調べ、定量化した。得られた結果を以下に示す。ただし、水面変動の有無やその標準偏差の値などは、水理条件で大きく異なる可能性があることに留意されたい。

1. 水面位は水深方向にある幅をもって変動していることが分かった。
2. 平均水面位は横断方向に変化することが分かった。
3. 水面位の変動の標準偏差は平均水深の数%ほどの大きさになり、その値も横断方向に変化することが分かった。

本研究により、等流条件を与えた固定床水路において、条件によっては横断方向の運動を考慮すべき流れがある可能性を示唆した。一方で、水面の変動がどの程度の流れならば横断方向の運動を考慮すべきかは不明であり、今後は、標準偏差などの統計的な指標を用いて、複数の水理条件での水面変動の大小を定量化し検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 日野幹雄 1983 明解水理学 丸善出版株式会社
- 2) 茂木大知, 村井剛徳, 安田浩保, 早坂圭司, 村松正吾: 砂州の形成・発達過程における水面測定の不確実性について, 第 39 回土木学会関東支部新潟会研究発表講演会論文集, 2021
- 3) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文集, 第 342 号, pp.87-96, 1984.
- 4) D. Moteki, T. Murai, T. Hoshino, H. Yasuda, S. Muramatsu, and K. Hayasaka, "Capture method for digital twin of formation processes of sand bars", *Physics of Fluids* 34, 034117 (2022).