急斜面上の常射流混在流れの実験と数値解析

広島大学大学院工学研究科　学生会員　○阿戸理樹
広島大学大学院工学研究科　フェロー会員　河原能久

１．背景と目的

近年、日本では地球温暖化による局地的集中豪雨が増加している。2014 年の広島豪雨災害では、豪雨が急斜面上に立地した市街地を襲い流速の早い表面流が突き抜ける流れとなり、家屋に直接的な被害を及ぼすだけではなく住民の避難行動を阻害することが懸念される現象が発生した。そのため、与えられた条件を変えていくことで流れの構造を調べることができる数値解析が治水対策のため用いられる。しかし、急斜面上に立地した市街地の事例では数値解析の検討があまりされていないため本研究では急斜面上での多様な条件でも精度の良い解析を行うことができるよう、検証実験を行い得られた解析結果と実験結果の比較、そして精度の検証を目的とする。

2. 実験の概要

本研究では、急斜面上に立地した市街地の氾濫流解析を念頭に置いて可変勾配の水路を用いて実験を行う。水路は勾配 1/30、水路幅は 30 ㎝、水路長は 3.0 ｍである。水深の測定にはポイントゲージを用いて計測し、跳水部から下流部にかけて水面変動が生じているため、サーボ式水位計を用いて測定した。**図 1** に使用した水路の簡易図を示す。

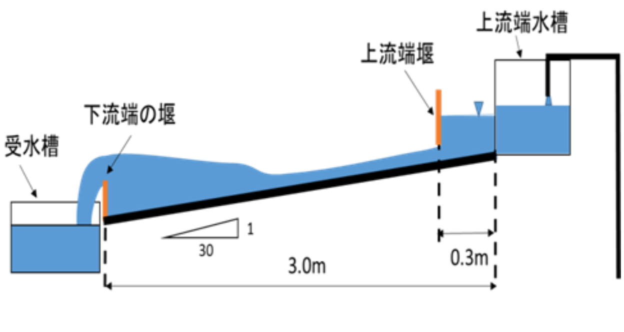

図 1 実験水路

表 1 に実験条件をまとめたものを示す。に実験条件を述べる。本研究では 3 ケースの実験を行い、多様な条件でも解析結果が精度よく水深を捉えることができるかの検証を行う。

表 1 実験条件

	流量(L/s)	河床勾配	底面状態	その他条件
Case-1	5.05	0.034	滑面	
Case-2	2.67	0.034	粗面	
Case-3	4.5	0.034	滑面	3cm間隔に水路中流部から1.5m配置

3. 離散化手法

3. 1　初期条件、境界条件、計算条件

実験から得られる結果を用いることで、数値解析を行う際の境界条件、初期条件として設定した。境界条件は下流端で得られた水深を使用した。初期条件は射流部の水深、流量をそれぞれ与え、計算条件として時間刻み幅は 0.001(sec)、空間刻み幅は 1.0 ㎝、格子数を 300 として計算を行った。

3. 2 離散化

使用した流れの連続式と運動量方程式を式(3. 1)、(3. 2)を示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \tag{3. 1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial f}{\partial x}+gA\frac{\partial Z}{\partial x}=-A\frac{\tau_{bx}}{\rho R} \tag{3. 2}$$

偏微分方程式(3. 1)の解析解を求めていく。計算上設定した定義位置を流量Q、流速uは格子点上で定義し水深h、水路床高さz_sは、格子点の中央、つまり半グリッド分だけずらした$i+1/2$の位置に定義している。離散化した式を(3. 3)に示す。

$$\frac{A_{i+1/2}^{n+1}-A_{i+1/2}^{n}}{\Delta t}+\frac{Q_{i+1}^{n}-Q_{i}^{n}}{\Delta x}=0 \tag{3.3}$$

偏微分方程式(3. 2)式の解析解を求めていく。左辺第一項は前進差分を用いて離散化を行っている。数値解析を行う上で問題の生じやすい移流項は、様々な離散化が可能であり、流束fを用いて離散化する。左辺第三項は中心差分を用いて離散化をする。離散化した式を(3. 4)に示す。

$$\frac{Q_i^{n+1}-Q_i^n}{\Delta t}+\frac{f_{i+1/2}^n-f_{i-1/2}^n}{\Delta x}+gA_i^n\frac{z_{si+1/2}^n-z_{si-1/2}^n}{\Delta x} =-\frac{gA_i^n n^2 u|u|}{R_i^{n\frac{4}{3}}}+\frac{1}{2}C_D\frac{\rho nDQ^2}{B^3h^2\Delta x} \tag{3.4}$$

移流項の離散化手法として TVD 法の一番簡易的な風上差分を使用している。風上差分法は、上式の移流項の差分の際、流速が正の値か負の値かというところで場

合分けを行っている。 u_j^{n+1}を得るためには$j+1/2$と$j-1/2$のセル境界を通過する流束fを評価する必要がある。しかし、離散化の際の定義位置の関係から定義は整数点で行う。 以下に示した流束fを用いた移流項の離散化を式(3.5)、(3.6)に示す。

$$f_{i+1/2}^{n}=\frac{1}{2}(u_{i+1}^{n}+u_{i}^{n})Q_{i+a}^{n} \tag{3.5}$$

$$f_{i-1/2}^{n}=\frac{1}{2}(u_{i}^{n}+u_{i-1}^{n})Q_{i-1+a}^{n} \tag{3.6}$$

4 考察

4.1 Case-1

流量 5.05 L/s の解析結果と測定結果の比較を**図２**に示す。上下流ともに解析結果が測定結果との水深差はほとんどなく水面形を正確に捉えることができている。跳水発生位置も実際の流れと比べ、良好な値を示した。

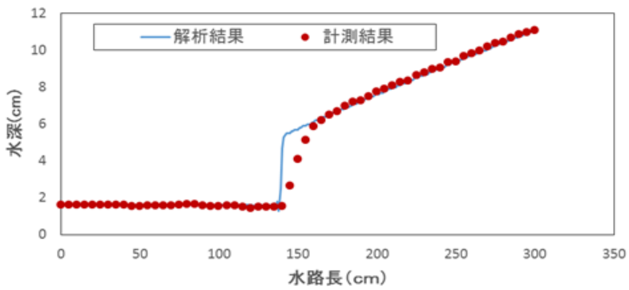

図２ 解析結果と測定結果

4.2 Case-2

図 3 に 粗面における解析結果と計測結果の比較を示す。上下流共に解析結果と計測結果の差はほとんどなく良好な結果を示しているといえる。しかし、*Fr* 数が変わり、波状跳水が形成されることによって生じる水面変動を解析結果が捉えることはなかった。浅水流方程式に跳水部を計算する項が含まれていないためここから伝わる変動を捉えることができなかったと考える。

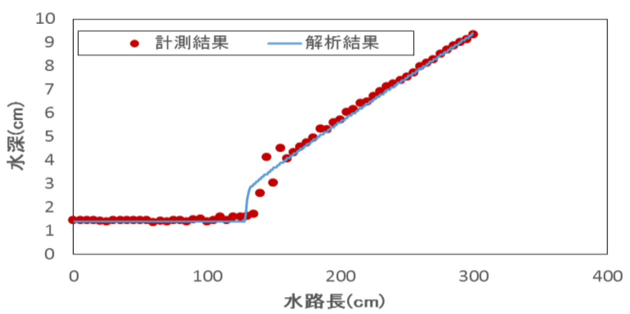

図 3 粗面での解析結果と測定結果の比較

4.3 Case-3

図 4 に障害物が非水没の計測結果と解析結果の比較を示す。抗力係数 *Cd*=0.44 として計算を行っている。水深が大きく上昇する X=0.5 m と下流端近傍では解析結果と計測結果にほとんど差はなく良好な結果を示しているといえる。しかし、跳水発生位置が大きく計測値から離れている。常射流混在流れの場合抗力係数が一定では計測結果と解析結果に差が出てしまうと考えられる。

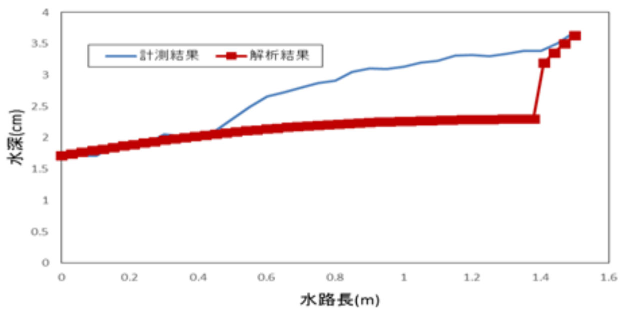

図 4 植生がある場合での解析結果と測定結果

次に**図 5** に抗力係数を場所毎に変化させた結果と**図６**に抗力係数と水深の対応関係を示す。上流部、下流部は抗力係数の値に大きな差はないが、水深が大きく変化する植生区間 X=0.5 m～1.0 m では抗力係数の値が大きく変化している。この区間では Fr=1 の境界となっている区間で抗力係数にもフルード数が影響を与えている可能性がある。

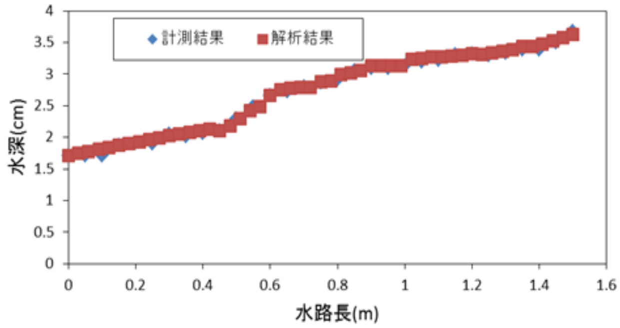

図 5 抗力係数を変えた場合の解析結果と計測結果

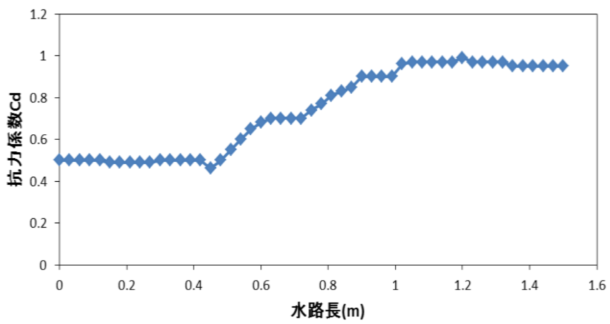

図 6 抗力係数と水深の対応関係