# 非構造格子有限体積法を用いた数値解析プログラムの精度向上

岡山大学環境生命科学研究科　学生会員　○松本　享之
岡山大学環境生命科学研究科　正会員　吉田　圭介
岡山大学環境生命科学研究科　フェロー会員　前野　詩朗

## 1. はじめに

現在では多くの川づくりにおいて多自然川づくりが実施され，水制や堰などの水理構造物を適度に配置し河道断面形状を様々に変化させるなどの工夫がなされている．そのような河道断面形状が複雑に変化する河川においては改修後の水理構造物周辺の流況変化を予測することが重要になるが，模型実験による方法では時間や費用といった簡易性の面で多くの制限を受けるため，近年では数値解析により河川流況を把握する方法が注目されている．

そこで本研究では，複雑な河道形状を有する場にもメッシュ生成が容易な非構造格子を用いた手法の解析プログラムを対象とし，常・射流が混在した流れに対する適用性を検討，及びその精度向上を試みた．解析結果の妥当性を検討するにあたっては，勾配の異なる直線水路，および単純な堰状の構造物を有する模型実験により構造物を回り込む流れや常・射流が混在した流れを再現し，その解析結果を比較することで解析法の妥当性を検討する．

## 2. 解析概要

### 2.1 解析方法の概要

本研究では平面 2 次元浅水流方程式を基礎方程式として数値解析を行う[1), 2), 3)]．このモデルは，水平方向の物理量を水深平均して取り扱うものであり，広範囲な領域の流況や洪水氾濫流を再現するモデルとして一般的に用いられている．有限体積法に基づき基礎方程式の離散化を行い，空間積分には流束差分離法を，計算格子には非構造格子を用いた．さらに，時間方向の離散化には 2 次精度 Adams-Bashforth 法を採用した．

解析プログラムの精度向上に当たり，計算の取扱い方法にいくつかの修正を加えた．その修正点を以下に示す．

**(1) ドライベット条件**

流出入させない条件，及び操作する数値の取扱いを見直した（**図-1**参照）．

(i) 対象セル $L$ がドライベッドかつ隣接セル $R$ がドライベッドの場合，隣接セルの水位に関わらず流出入なし．

(ii) 対象セル $L$ がドライベッドかつ隣接セル $R$ がウェットセルの場合，図のbのように対象セルの水位が隣接セルより大きければ流出入なし，aのように小さければ通常処理．

(iii) 対象セル $L$ がウェットセルかつ隣接セル $R$ がドライベッドの場合，bのように対象セルの水位が隣接セルより大きければ通常処理，aのように小さければ流出入なし．

(iv) 対象セル $L$ がウェットセルかつ隣接セル $R$ がウェットセルの場合，隣接セルの水位に関わらず通常処理．

(v) 隣接セル $R$ が閉境界の場合流出入なし．

対象セルと隣接セル間に流出入がない場合，隣接セルに $h_R = h_L, z_R = z_L, u_R = -u_L, v_R = -v_L$ のノンスリップ条件を与える．

ここに，$h$：水深，$z$：河床高，$u$：$x$ 方向の流速，$v$：$y$ 方向の流速とする．

**(2) 摩擦勾配の取扱い**

$x, y$ 方向の摩擦勾配 $S_{fx}$，$S_{fy}$ を要素各境界線ごとに

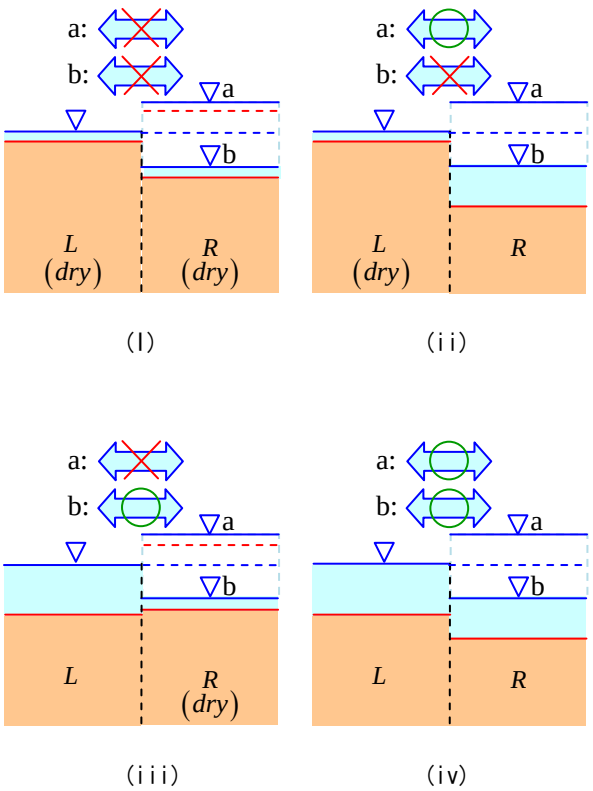


図-1　セル境界における流出入流量の制御

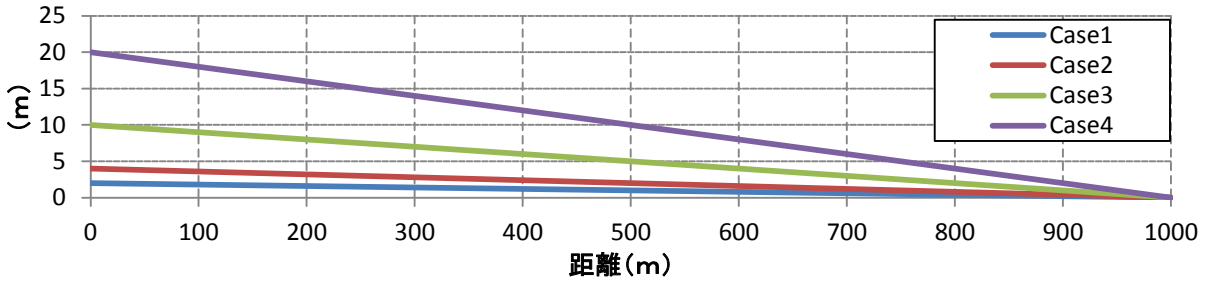


図-2　水路の河床高

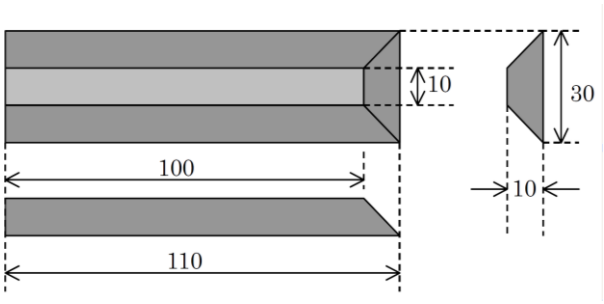


図-3　構造物形状

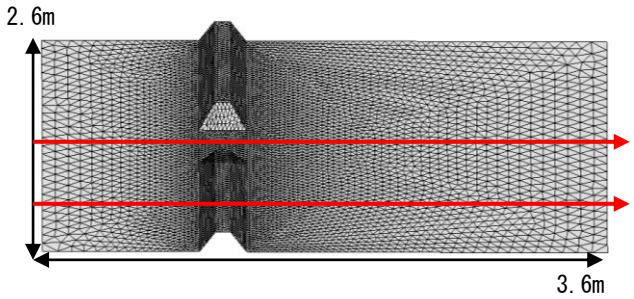


図-4　水路状況

表-1　解析条件と諸定数

| 諸定数 | Case1-M1 | Case2-M1 | Case3-S1 | Case4-S1 | Case3S1.2 | Case4S1.2 | Case1-M2 | Case2-M2 | Case3-S2 | Case4-S2 | Case3S2.2 | Case4S2.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 設定流量(㎥/s) | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| クーラン数 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| マニングの粗度係数 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.01 | 0.01 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.01 | 0.01 |
| 下流端水深(m) | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 上流端水深(m) | | | | | | | 0.467 | 0.467 | 0.467 | 0.467 | 0.467 | 0.467 |
| 初期水深(m) | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 初期流速(m/s) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| hmin(m) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 計算終了時間(s) | 3600 | 3600 | 7200 | 7200 | 7200 | 7200 | 3600 | 3600 | 7200 | 7200 | 7200 | 7200 |

計算する方法から，対象セルの変数として取り扱うように変更した．

## 2.2 解析モデルの概要

### (1) 一様水路モデルの概要

プログラムの改良による解析結果の精度向上を検討するため，4ケースの勾配の異なる一様な水路で解析を行った．解析水路は**図-2**に示す幅10m，長さ1000mの勾配1/500，1/250，1/100，1/50の長方形断面水路を両岸スリップ条件で解析した．河床勾配が大きな条件Case3，Case4では粗度係数を変化させた．なお，Case3，Case4では定常状態に達する計算時間を要したため，計算終了時間をCase1，Case2の数値の倍の値に設定した．改良前後の解析結果と一次元不等流解析の結果を比較し，その解析精度を評価した．**表-1**に解析条件と諸定数を示す．

### (2) 堰を有する水路モデルの概要

ドライベット条件の変更により水際部での計算が正しく機能しているかを確認するため，水路幅 2.6m，長さ 3.6m，勾配 0 の長方形断面水路に**図-3** に示す堰を設置するモデルを設定した．堰が非水没と水没する条件で検討するため，**表-2** に示すように流入流量を変化させた Case1～3 で解析を行った．計算メッシュはいずれのケースも**図-4** に示すものを適用し，流入境界は図の左側とした．また，クーラン数の取扱いを検討するため Case1 のみクーラン数 0.4 と 0.7 で比較した．計算終了時間は流況が安定した定常状態となるように設定した．解析結果の精度向上を検討するため，水路の右端から 50cm 及び水路中央のラインに沿ったセルの水位と河床高を抽出し，実験結果と本解析結果を比較した．

表-2　解析条件と諸定数

| 諸定数 | Case1 | Case2 | Case3 |
|---|---|---|---|
| 設定流量(㎥/s) | 0.01406 | 0.07218 | 0.10034 |
| クーラン数 | 0.4, 0.7 | 0.4 | 0.4 |
| マニングの粗度係数 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 下流端水深(m) | 0.066 | 0.108 | 0.123 |
| 上流端水深(m) | 0.467 | 0.467 | 0.467 |
| hmin(m) | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 計算終了時間(s) | 2000 | 2000 | 2000 |

## ３.結果および考察

### 3.1 一様水路モデル

**図-5**は，Case2-M1の緩勾配水路に現れる水面形M1の解析結果を示している．図の解析値（旧），（新）は，それぞれ改良前と改良後の結果を示している．図では分かりにくいが，プログラム改良前では等流部分において一次元解析で得られる等流水深と2%程度の誤差が見られた．改良後の水面形はその誤差が0.06%ほどに抑えられており，改良による精度向上が確認された．

**図-6**は，Case4-S1.2の急勾配水路に現れる水面形S1の解析結果を示している．勾配が大きくマニングの粗度係数が0.01と小さい場合には，改良前の下流端付近の計算が不安定な状態となった．改良前は跳水位置が上流側にかなりずれているが，改良後は流れが安定し，跳水が想定される個所で発生している．粗度係数が大きい場合には，改良前後で有意な差は見られなかった．このことより急勾配水路における粗度係数が小さい条件下での解析精度が向上したと言える．

**図-7**は，Case1-M2の緩勾配水路に現れる水面形M2の解析結果を示している．改良前の解析結果は下流端付近を除き全体的にCase2-M1で述べた程度の誤差が生じていたが，改良後はCase2-M1と同程度の誤差に改善された．しかし下流端に着目すると水深が一次元解析値を少し上回る結果となった．これは下流端に隣接するメッシュで計算を行う場合，架空のセルを隣接するセルとして対象セル自身の流速，水深，河床高を与え計算するというプログラム上の条件により，下流端で水路の勾配が反映されず水深が高く評価されてしまったと考えられる．

**図-8**は，Case4-S2の急勾配水路に現れる水面形S2を想定した解析結果を示している．改良の有無もかかわらずM2の結果同様，解析値はほぼ一次元解析の数値と一致した．また，改良後は改良前に比べ上流端付近で一次元解析とよく一致したが，上流端付近で若干の水面形の乱れが見て取れた．粗度係数が小さいケースでは改良後の振動は見られなかった．

### 3.2 堰を有する水路モデル

非水没の流況が現れる解析結果および実験での水面形を**図-9,10**に示す．全体的に実験値に沿うような結果を得ることができたが，上流側では差が大きい点も見られた．また，クーラン数の取扱いによって流況解析の変化を確認した．**図-11,12**に示す流速分布を比較すると堰間の開口部を通過した流況がクーラン数0.7の条件の場合にかなりの擾乱が見て取れる．このような擾乱の激しい場所ではクーラン数を小さくすることで安定した解析が行えるようになることが分かった．このことは適切なクーラン数を用いることにより，安定した計算結果を得られることを示している．紙面の都合上示していないが，水没の場合の改良後の結果は実

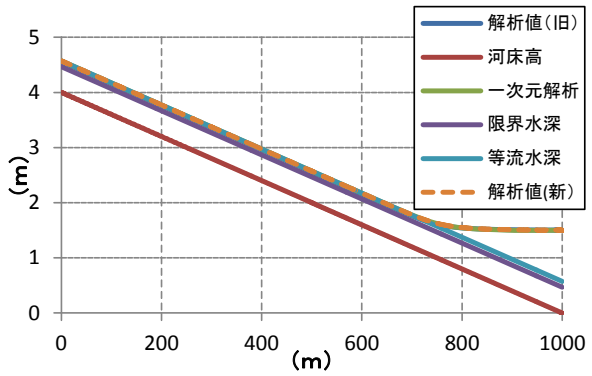


図-5　水面形（Case2-M1）

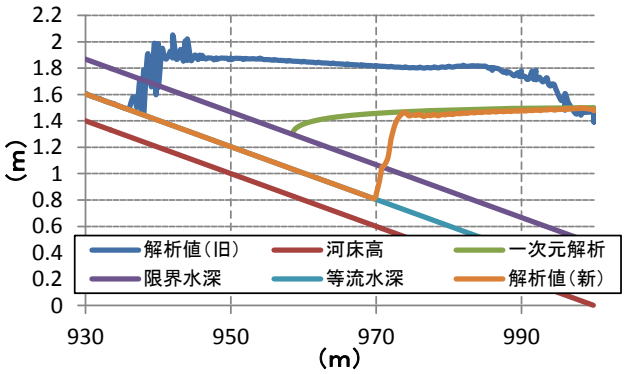


図-6　水面形（Case4-S1.2）

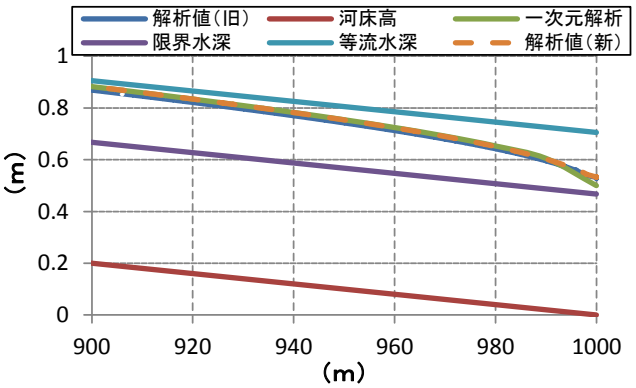


図-7　水面形（Case1-M2）

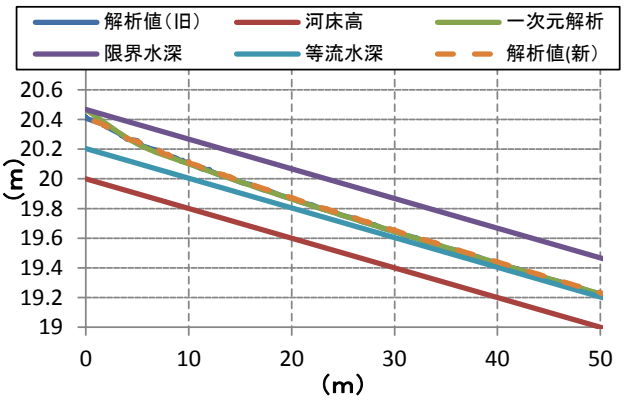


図-8　水面形(Case4-S2)

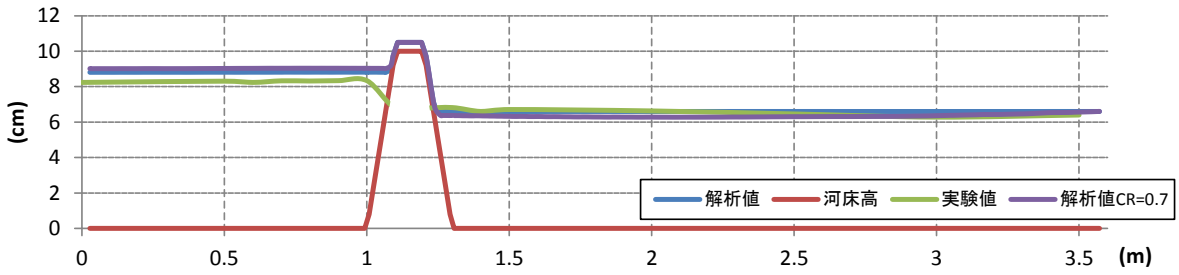


図-9　水面形（Case1-50cm）

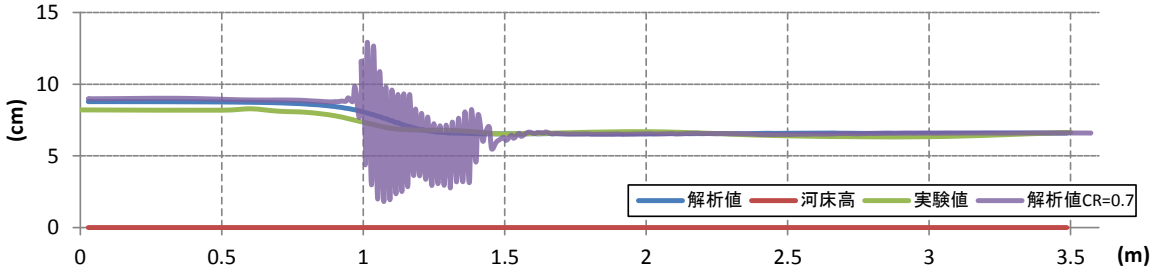


図-10　水面形（Case1-130cm）

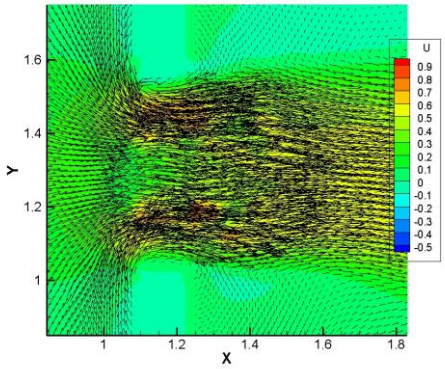


図-11　流速分布（Case1. CR=0.7）

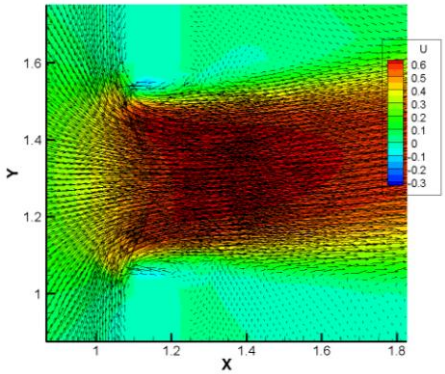


図-12　流速分布（Case1. CR=0.4）

験結果をよく説明できている．

## ４．結論

本研究ではFDS法を用いた解析の改良を行い，緩勾配と急勾配の試験水路を用いた解析により精度向上の効果を検討した．その結果以下のことを明らかにした．

(1) 緩勾配水路の流況解析において，本研究で示した改良法により等流状態での流況解析の水深の誤差が少なくなり，精度向上が見られた．

(2) 急勾配水路の流況解析において，射流から常流へ変化する跳水現象も大きな乱れなく解析可能となった．

(3) 非水没セルを含む流況を解析した結果，クーラン数を小さくすると実験結果をよく説明できることが分かった．

このことより改良後のプログラムでは常射流を含む流況をより高い精度で解析できるようになったといえる．しかし，高い粗度を持つ急勾配水路において，上流端付近の計算結果が少し乱れ，一次元解析値と誤差が生まれてしまっていた点を今後改善する予定である．

## 参考文献

1）前野詩朗，小川信：非構造格子有限体積法による水理構造物周辺流れの数値解析，応用力学論文集，Vol.6，pp.857-864, 2003.

2）アキレス クマール ジャ，秋山壽一郎，浦勝，重枝未玲：ＦＤＳを用いた洪水流の数値モデル，土木学会論文集，No.656/II-52, pp.73-82, 2000.

3）重枝未玲，秋山壽一郎，重岡広美：ドライ・ウェット状態となる地形起伏がある場での氾濫流の数値シミュレーション，水工学論文集，第51巻，pp.23-28, 2007.