

有限体積法による湾曲部及び合流点における水面形の再現

筑波大学大学院生命環境科学研究科 ○江藤稚佳子
 国立研究開発法人土木研究所 水野秀明

1 はじめに

数値計算は土砂災害対策の中で重要な役割を担うようになってきた。山地流域の溪流が湾曲や合流、湛水地といった複雑な形状であるため、数値計算ではそのような複雑な地形でも精度を保つ必要がある。湛水地での静水や流水に適応できる数値モデルは各々提案されてきているものの、同一の数値モデルで静水や流水の状況を適切に計算できるかという点（適用性）や水路模型実験や実際の溪流における現象を再現できるかという点（再現性）が明らかになっていない。そこで、本研究では、様々な状況における水と土砂の動きを高精度で予測できる数値計算の手法の開発を目標として、2次元浅水流方程式を有限体積法で離散化した水理モデルを用いて水路模型実験の再現計算を行い、台形断面の湾曲部の偏流や合流部のせき上げと跳水への適用性と再現性を明らかにすることを目的とした。

2 数値モデルの概要

数値モデルは2次元浅水流方程式を有限体積法で離散化したものとした（Ankai et al., 2014）。変数の設定方法は計算要素内の水深が線形で分布する「線形補間法」（水野ほか, 2016）を採用した。すなわち、(1)計算要素内の水面の勾配が境界に作用する静水圧とつりあう、(2)計算要素内の堆砂の表面が平面であると仮定し、計算要素の領域 S 内の水深 \bar{h} が

$$\iint_S \nabla \left(\frac{1}{2} g \bar{h}^2 \right) dS \equiv \int_C \left(\frac{1}{2} g h_*^2 \right) \vec{n} dC \quad \dots \text{式(1)}$$

を満たすように分布するとした。ここで、 S ：水平面（xy平面）上で固定した領域（計算要素）、 C ：計算要素を囲む閉曲線、 g ：重力加速度[m/s²]、 \bar{h} ：計算要素内の水深[m]、 h_* ：閉曲線 C 上の水深[m]、 \vec{n} ：曲線 C 上の微小線分 dC に対して垂直で外向きの単位ベクトルである。また、速度ベクトルは計算要素内で均一である。ただし、底面摩擦力ベクトルの回転（rot）の値が必ずしも0でないため、計算要素内の渦度は常に0とは限らない。本研究では渦度が大きくないと仮定し、水深が線形で分布しているものとして扱った。なお、計算精度を比較するために、セルアベレージ法でも計算を行った。

3 水路模型実験の再現計算

3-1 水路模型実験の概要

実験では、2つの流路の上流端から給水装置を用いて同時に給水を開始し、図中の3断面で水深計測装置を用いて水深を計測した（図-1）。水路模型は地形条件が計算精度に影響を与えないように、地形条件に用いるTINに従って厚さ0.10mの樹脂を削り出して作成した。流路Aの給水装置は径を3つ（φ13mm、φ20mm、φ30mm）を準備した。流路Bの給水装置はφ13mmの1つを準備した。図-2に給水装置から供給される水の量の時間変化を示した。

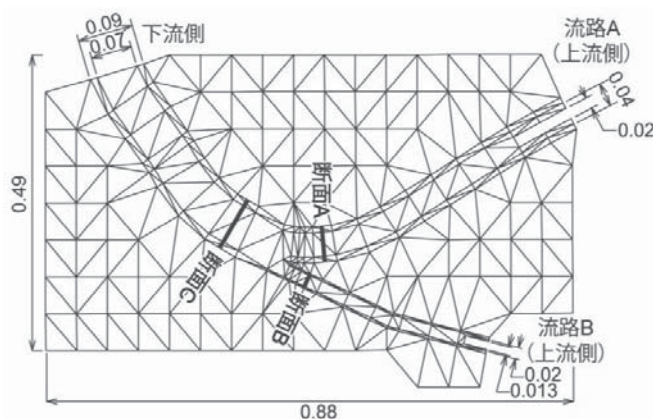


図-1 計算要素と計測断面（φ20mmの場合）

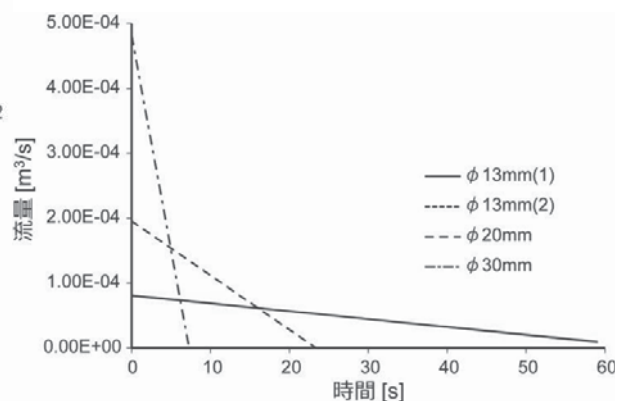


図-2 給水装置の水量の時間変化

3-2 再現計算の結果

流路A及びBの上流端から供給した水の水深は、給水装置の出口の内径の断面積を直径で除した値で一定とした。速度は図-2の流量を給水装置の出口の断面積で除して計算した。その水深と速度より水深と単

位幅流量を計算し、境界条件として与えた。粗度係数は実験結果より得られた 0.01 を採用した。

図-3 は、 $\phi 20\text{mm}$ の場合の $t=10\text{s}$ における水位、図-4 は各計算要素の速度ベクトルを示したものである。水位は横断の底面からの高さとした。線形補間法を用いた場合、流路 A の湾曲部では、水面形が内湾側に比べて外湾側で高くなった。速度ベクトルは流路部と側岸部共に流心線とほぼ平行な向きになり、流路部に比べて側岸部で小さくなった。また、合流点の流路 B ではせき上げと跳水を計算できた。水位の実験結果と計算結果を比較すると、流路 B では両者が概ね一致するものの、その他の断面では計算結果が実験結果に比べて高くなった。これは、線形補間法を用いた場合に等流状態での粗度係数を用いると底面摩擦力が大きくなるためである。そこで、実験結果を概ね再現できる粗度係数を試行錯誤して求めたところ、値は 0.004 となり、実験結果に比べ低い値であることが分かった。セルアベレージ法を用いた場合、水面形は階段状となり、水位は湾曲部の外湾側で水路の側岸より高くなった。速度ベクトルは流路部で流路の流心線と平行になるが、側岸部で斜面の勾配と概ね平行となった。水位の実験結果と計算結果を比較すると、流路 A 及び B 共に流路部で概ね一致するが、側岸部で 2 倍以上高くなり、再現性が低くなった。以上のことから、線形補間法を用いた数値モデルは、台形断面の湾曲部での偏流や合流部周辺でのせき上げと跳水に適用でき、その水面形を精度良く再現できることが分かった。

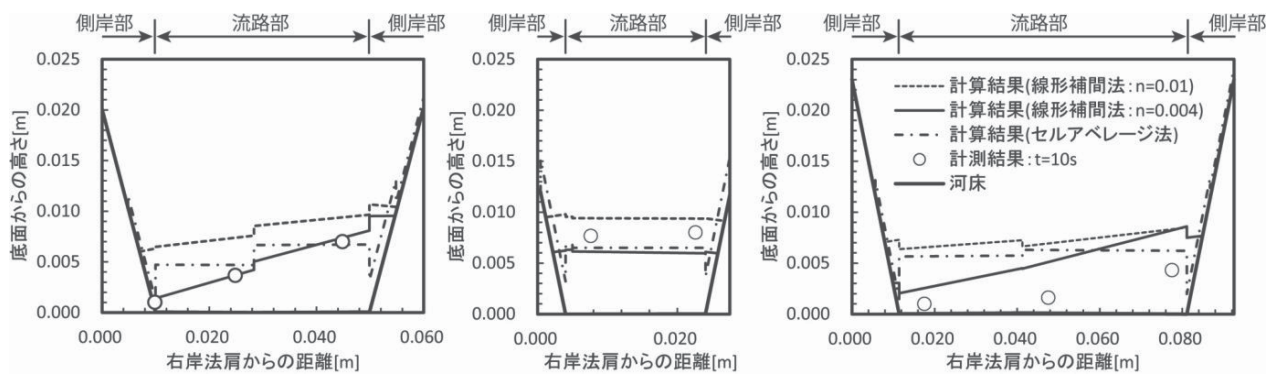


図-3 水位の実験結果と計算結果の比較 (左：断面 A, 中央：断面 B, 右：断面 C)

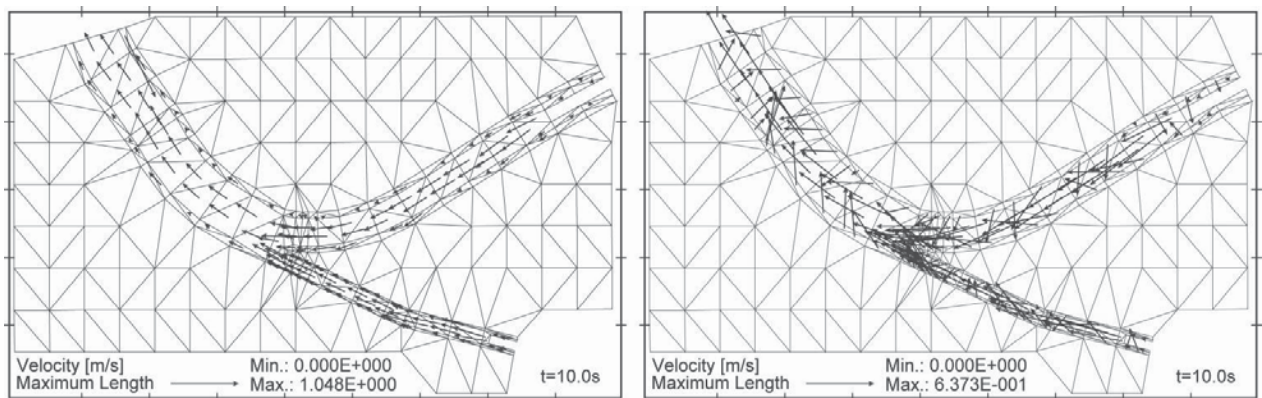


図-4 速度ベクトル (左：線形補間法, 右：セルアベレージ法)

4 おわりに

本研究では、計算要素内の水深が線形で分布する線形補間法を用いた場合、湾曲や合流を持つ流路における水深や速度ベクトルの計算へ適用でき、その水面形の変化を概ね再現できることが明らかとなった。また、底面摩擦力ベクトルが再現性に影響を与えることが分かった。今後の課題として、粗度係数の設定方法の検討を行い、水面形の再現性を向上させると共に、侵食・堆積モデルの検討を行い、実際の土石流現象へ適用してその再現性を明らかにしていきたい。

引用文献

- Ankai T., Mizuno H. and Sekine T. (2014): Numerical analysis of blockage in a channel work by stony debris flow, The 5th International Workshop on Multimodal Sediment Disaster, p.49-56
 水野秀明・関根 敬・江藤稚佳子・倉本和正 (2016) : 静水状態を考慮できる有限体積法による段波の再現, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol.8, No.1, p.13-20