

開水路における水面変化のシミュレーション

室伏 瞳 (指導教員: 河村 哲也)

1. はじめに

河川は人の生活に密着しており、治水、利水計画が進み、多くの河川構造物が造られている。このように河川を上手に利用するためには、河川の流れについて詳しく解明していく必要があり、現在でも多くの水理模型実験が行われている。

しかし、この水理模型実験には、多くのコストと時間が必要となり、空間的制約も受ける。そこで、模型実験と平行し、精度のよい数値解析を実現すれば、河川流れの現象が解析でき、河川自体の流下能力や性能評価、及び、河川構造物等の性能設計にも有用である。

そこで本研究では、開水路の河道形状の違いが水面の変動にどのような影響を及ぼすかを 3 次元計算で解析することにした。

2. モデル化

図 1 に使用した水路の形状を示す。ただし、 x 方向は流れ方向、 z 方向は鉛直方向とする。本研究では、河床にある突起部分を超えるときの様子と、支流を本流に合流させたときの様子について計算することとした。

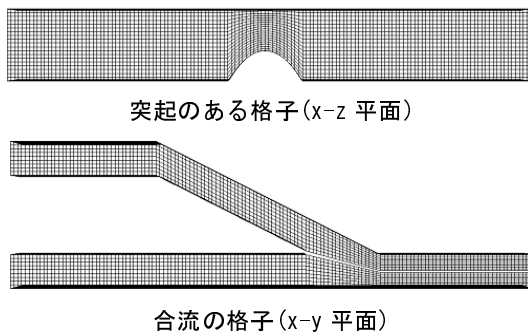


図 1 格子の形状

3. 計算方法

3.1 基礎方程式

本研究においては、水は非圧縮性であるとみなす。非圧縮性流体の流れは、連続の方程式とナビエ・ストークス方程式を支配方程式として解くことができる。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \Delta \mathbf{V} + \mathbf{g}k \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{V} は速度ベクトル、 p は圧力、 t は時間、 Re はレイノルズ数、 \mathbf{g} は無次元重力加速度、 k は z 方向の単位ベクトルである。これらの方程式を連立させ、非

圧縮性流れの標準的な解法である MAC 法を用いて数値的に解いた。境界条件は、壁面上での流速を $\mathbf{V} = 0$ とし、圧力は自由表面上で $p = 0$ 、底面では $p = \rho g H$ (H : 水深) とした。

3.2 自由表面

図 2 に水面形状を変化させる方法を示す。自由表面上では、境界形状が時間とともに変化することを考慮する必要がある。まず、水面上の格子点に着目し、それを時間 n における鉛直方向速度にあわせて移動させ、時間 $n+1$ の水面上の格子点とする。そして、水面と底面の間を等分割して格子を作り変え、これを時間ステップごとに行う。また、格子の時間的变化による影響を方程式に取り入れることで、自由表面の形状を示すこととした。

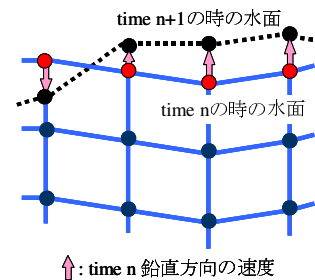


図 2 自由表面の格子

4. 計算結果

4.1 突起を超える波

河床の突起形状は、放物線形の突起と、頂上部にある程度の水平部分がある突起の 2 種類とした。それぞれの場合において、水面が定常状態になるまで計算を行い、その後、波を発生させ、突起を超える様子を観察した。

図 3 に河床が水平の場合での定常の様子、波の伝播の様子を、 $x-z$ 平面から見た水面と速度ベクトルで示す。波が下流に伝わるにつれて、徐々に振幅が大きくなり、波高は小さくなっている様子が再現できていることがわかる。

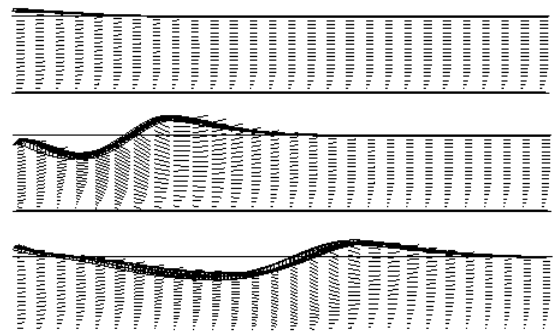


図 3 河床が水平の場合 ($x-z$ 平面)

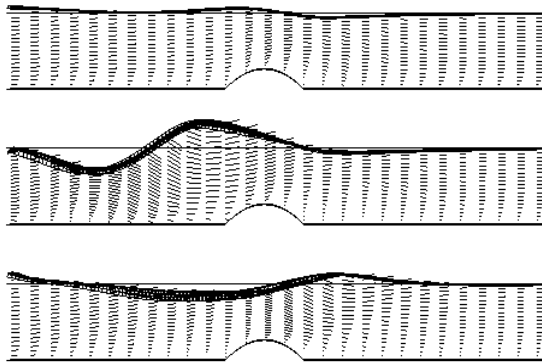


図4 突起が放物線形の場合(x-z 平面)

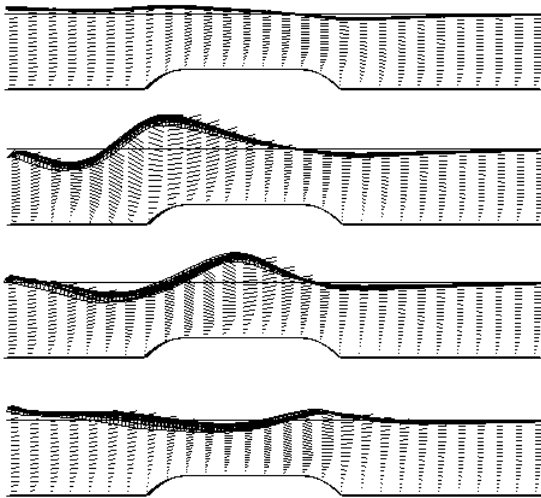


図5 突起に水平部分のある場合(x-z 平面)

図4に河床に放物線形の突起がある場合の定常の状態と、突起の前後における波の様子を示す。突起を上昇するとき波が大きくなるが、突起を超えることで波の振幅が小さくなっていることがわかる。

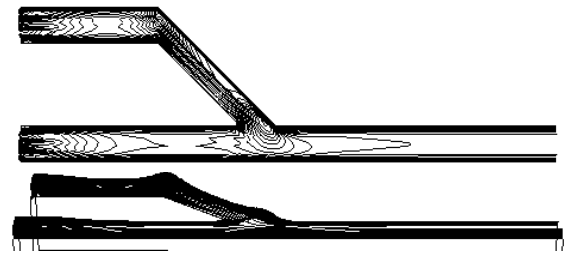
図5に河床の突起の頂上部に水平部分がある場合の定常の状態と、突起の前後および水平部分における波の様子を示す。突起の上昇とともに大きくなった波が、水平部において急激に小さくなる様子が見られる。

4.2 合流の様子

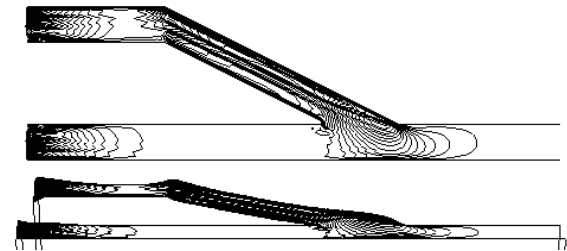
合流地点の様子は、支流を直線型の水路でつないだそれぞれ傾きの異なる(a)(b)と、合流位置を(b)と等しくし、曲線型の水路つないだ(c)の3種類について行った。

図6にx-y平面と斜め上方から見た水面上の等高線を示す。支流が直線型の水路(a)(b)では、支流の末端部分で壁の抵抗を受け、上流側が大きく隆起している様子が見られる。中でも、支流の合流角度が大きい水路(a)が水面上昇も大きくなっていることがわかる。

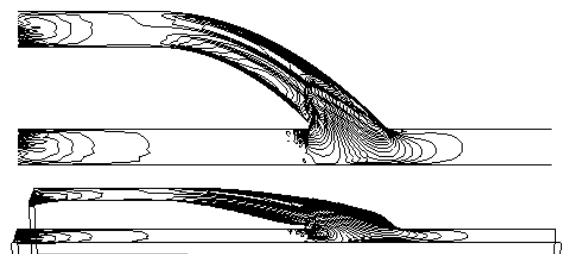
支流の接合部分では、どの場合においても外側の水位が上昇していることを確認できる。外側と内側の水位差



(a) 合流角度 45°



(b) 合流角度 30°



(c) 曲線型

図6 合流したときの水面形
(上:x-y平面、下:ななめ上方から見た図)

は、支流の末端部における水流の制御がない水路(c)で最も大きく見られ、そのまま合流地点Bにおいても、外側の水位が大きく上昇していることがわかる。

5. まとめと今後の課題

自由表面を考慮した水路流れの計算を行うことができ、水面変形が起こりうる場合の2つのモデルを作ることができた。また、波を発生させ、河床形状により波の伝播が異なることを再現することができた。

今後は、乱流および河床変動を考慮し、より実在する開水路により近い流れについて検討したい。

[謝辞]

本研究を進めるにあたりご指導いただきました河村先生、本研究室の先輩方に深く感謝いたします。

[参考文献]

- ・河村哲也:「河川のシミュレーション!」インデックス出版、2004 ISBN4-381-01688-2
- ・手山奈緒子:「水波の伝播の数値シミュレーション」お茶の水女子大学修士論文、2005