

バックウォーター現象の数値シミュレーション

柏井那美（指導教員 河村哲也）

1 はじめに

近年、日本では、局地的大雨や集中豪雨が増加傾向にあり、被害が全国的に見られる。2018年7月には西日本を中心にして、「平成30年7月豪雨」と呼ばれる集中豪雨が発生した。この災害の中で、もっとも人的被害が多かった地域は岡山県倉敷市である。岡山県倉敷市では、計8ヶ所の堤防の決壊がおこった。これらの堤防決壊を引き起こした、大きな要因としてあげられるのがバックウォーター現象である。高梁川と小田川の合流地点は、直後に高梁川が湾曲して川幅が狭くなるボトルネック構造となっており水位が高くなっている。豪雨で水かさが一層増したことにより、勾配が緩やかな小田川の水は、合流を阻害され水位が上昇し越水を引き起こした。そして高梁川の水位上昇の影響は、ドミノのように広がり、小田川の支流である、高馬川や末政川、真谷川の水位も上がり、堤防が次々に破壊する事態となった。バックウォーター現象が起きる条件として、水路の形状と本流と支流の流れの速さの違いが関係していると考えられる。

そのため本研究では、数値シミュレーションにより、川の流れの速さや形状といった条件の違いが与える影響を考察する。

2 モデル化・格子生成

2.1 計算領域

本流と支流の二つの川を考え、逆流が起きる様子を流れ場を調べながら観察する。形状は、Y字に合流した川、直角に合流した川を考える。高梁川と小田川はY字に合流している。高梁川と小田川のモデルに近づけるため、Y字形状に関しては、合流地点先を狭くしたものそうでないもの考える。

Fig.2.1のように、本流と支流の流入部に指定された流速を与える。流出部は、自由流出とする。

初期状態では、支流の流速を1とし本流の流れをCaseごとに1～3と変える。川の側面・底面・上面はすべて無壁とする。支流の流れの速さ1に対して、本流の流れの速さを1～3に変化させる。地点Aにおける速度変化を観測し比較していく。

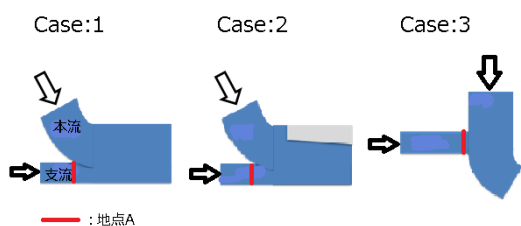


Fig. 2.1: 川を真上から見た図

2.2 格子

格子数は、流れ方向、川幅方向、深さ方向に $95 \times 60 \times 60$ とした。xy面においては、曲線格子を用いる。z面においては、不等間隔格子を用いる。

3 計算方法

3.1 基礎方程式

空気と水の2流体モデルを使用する。このモデルでは、水面は密度差のある面として表現される。尚、本研究では、密度差の代わりに温度差を用いる。したがって、3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式、温度方程式を基礎方程式として使用する。

3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\nabla P + \frac{1}{Re} \Delta v + ATk$$

$$\nabla \cdot v = 0$$

温度方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla) T = \left(\frac{1}{Re \cdot Pr} \right) \Delta T$$

v : 速度, P : 圧力, Re : レイノルズ数,
 A : 浮力, k : 鉛直方向単位ベクトル,
 T : 温度, Pr : プラントル数

3.2 解法

上記の方程式をフラクショナル・ステップ法、と3次精度上流差分を用いて解く。 $\Delta t = 0.001$, 計算ステップは100000回とした。

4 結果と考察

4.1 地点Aにおける速度変化

地点Aにて観測した速度変化は Fig.4.1.1 の通りである。

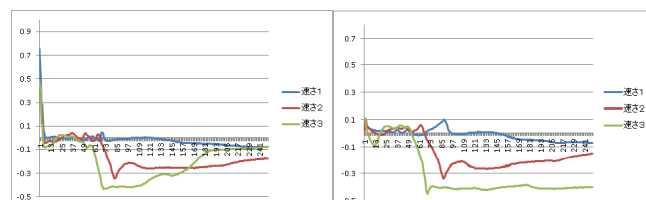


Fig.4.1.1: Case:1 と Case:2 における速度変化の比較

縦軸は速度、横軸はステップ数を表している。速さの比がいずれの場合も速度が負の値を示していることから、逆流が起きていることが分かる。速さの比が大きくなるほど、逆流が起きるまでの時間が短く、逆流

の最高速度が大きいことが読み取れる。また、Case:1とCase:2を比較すると、逆流が起きるまでの時間は大差がないが、速さの比が3:1の際に、Case:2では逆流の流速が大きい状態が長く続いていることが読み取れる。すなわち逆流している流量が多いといえる。逆流の流量が多いことから、バックウォーター現象が起りやすくなっていると考えられる。

4.2 流れ場

Fig.4.2.1からFig.4.2.9は、Case:1からCase:3の最終の流れ場をそれぞれ示したものである。白い矢印は流速ベクトルを表す。

Case:1とCase:2の流れ場を見ると、流速の比がいずれの場合も合流地点付近の支流の外側に逆流が起きていることがわかる。本流の流速が支流より大きくなるほど、より流速が大きな逆流が確認できた。また、本流のモデルはカーブを描いており、遠心力が働いたために外側の流速が大きくなる。そのため、流入の際に1:1で速さを与えても、合流地点において速さの違いが生じて逆流が生じたと考えられる。また、Case:2の流れ場では、Case:1よりも逆流は上流で生じ、流速も大きくなっている。合流地点先が流れにくくなることは、バックウォーター現象が起きることに大きく影響しているといえる。

Case:3の流れ場をみると、支流において逆流が生じていることがはっきりと読み取れる。しかし、Case:1,Case:2とは異なり、合流直後が逆流するという結果が得られた。これは、本流と支流の合流により流量が急激に増加し、それらが川の側面にぶつかり跳ね返ったことによるものだと考えられる。本研究では、河床勾配を考慮しておらず、側面や底面はすべて無壁としているため、このような結果が得られたと考えられる。合流地点の角度を変えたことにより、合流後の川の流れが異なることが分かった。今回、Y字と直角という極端なモデルを扱ったが、合流角度の違いもバックウォーター現象の発生に影響を与えるのではないかと考えられる。

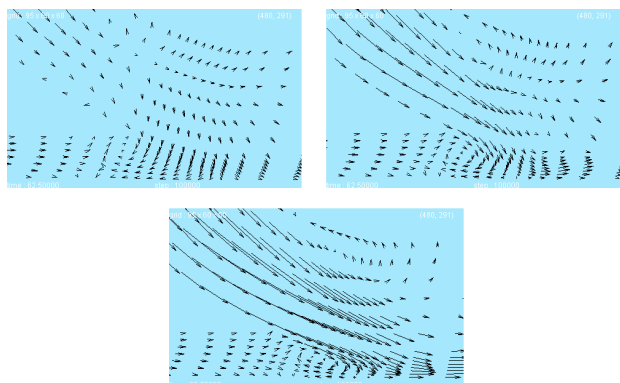


Fig.4.2.1: (左上) Case:1における流れ場の様子 (1:1)
 Fig.4.2.2: (右上) Case:1における流れ場の様子 (2:1)
 Fig.4.2.3: (下) Case:1における流れ場の様子 (3:1)

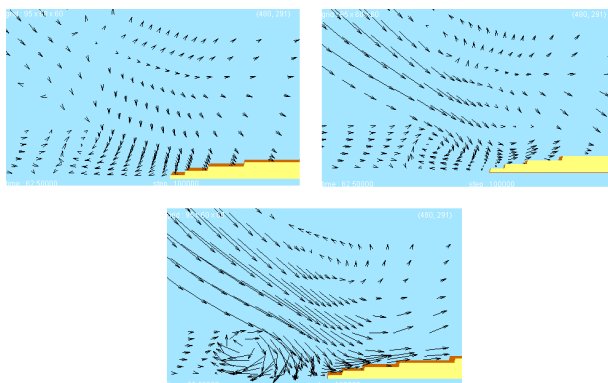


Fig.4.2.4: (左上) Case:2における流れ場の様子 (1:1)
 Fig.4.2.5: (右上) Case:2における流れ場の様子 (2:1)
 Fig.4.2.6: (下) Case:2における流れ場の様子 (3:1)

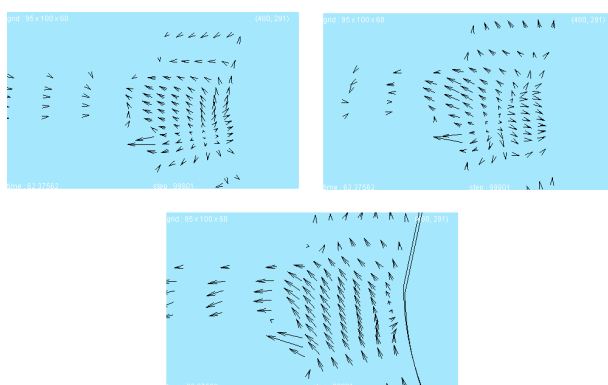


Fig.4.2.7: (左上) Case:3における流れ場の様子 (1:1)
 Fig.4.2.8: (右上) Case:3における流れ場の様子 (2:1)
 Fig.4.2.9: (下) Case:3における流れ場の様子 (3:1)

5 まとめと今後の課題

バックウォーター現象が起きる条件に着目した。川の形状や2つの川の流れの速さを変化させながら、それらの条件がどのように影響を与えるのか、数値シミュレーションにより検証した。その結果、川の流れの速さの比において、支流の流れの速さに対して本流の流れの速さが大きくなればなるほど、逆流が発生するまでの時間が短く、逆流の流速も大きくなることが分かった。また、合流地点先が狭くなる形状の川は、よりバックウォーター現象を引き起こしやすいことが分かった。今後は、川幅や堤防の高さ、河床勾配による効果などを取り入れると共に、合流角度を変化させながら数値シミュレーションを行い、どのような流路経路の川が、バックウォーター現象を引き起こしやすいのか検証していく所存である。

参考文献

- [1] 河村哲也. 数値シミュレーション入門. サイエンス社, 2006.
- [2] 国土交通省気象庁
<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/>