

河川の合流部近くの流れの解析

古関七菜 (指導教員: 河村哲也)

1 はじめに

昨年 2019 年 10 月, 過去最強クラスの台風 19 号が大型で強い勢力を保ったまま上陸し, 西~東日本の広い範囲で大雨・強風となった. 中でも関東甲信越や東北地方では経験したことのないような記録的な大雨が降り, 大規模な災害に見舞われた. すなわち河川氾濫や土砂災害などが相次ぎ, 広い範囲で多くの人的被害が発生した. また, 千曲川や多摩川, 阿武隈川など一級河川を含む少なくとも 71 の河川で堤防が決壊したことで, 住宅や福祉施設などが甚大な被害を受けた. 流域面積が広い河川で, 上流部や支流において被害が発生した河川においても, 大量の洪水がさらに下流に押し寄せて, 堤防の決壊や越水による被害が発生した. また, 河川の合流部において, バックウォーター現象 (増水した本流の流れにせきとめられる形で支流の水位が急激に上がる現象) 等によって支流が氾濫し, 本流等の洪水も引き込んで浸水被害が拡大した.

そのため本研究では, 数値シミュレーションにより, 河川の流れの速さや合流部の形状による流れの違いに着目し, 堤防強化すべき箇所や氾濫のリスクが高いと考えられる場所の回避について提案する.

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, 水位の変化や流れの向きについて観察する.

形状は, 平行に合流する川, 直角に合流する川を考える. 曲線部をもつ川では曲線部は円の一部とした.

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, 自然流出とした.

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 ~ 4 と変える. 川の側面, 底面はすべり無し壁とし, 上面は自由表面とする.

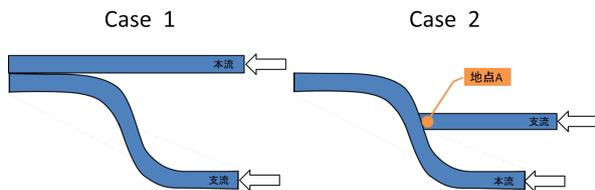


Fig. 2.1: 川を真上から見た図

2.2 格子

格子数は, 川幅, 流れ, 深さ方向にそれぞれ $21 \times 130 \times 20$ とした (Fig. 2.2). Case2 では, 支流が合流しても氾濫しないように, 本流の川幅を流入口から流出口まで徐々に広げた.

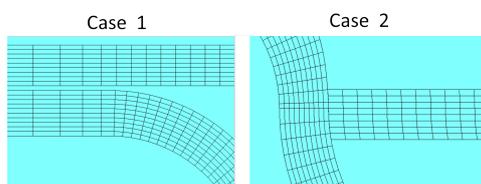


Fig. 2.2: 合流部付近の格子

3 計算方法

3.1 基礎方程式

連続の式, Navier-Stokes 方程式を使用する.

連続の式

$$\nabla \cdot V = 0$$

Navier-Stokes 方程式

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

P : 圧力 (静水圧からのズレ), Re : レイノルズ数

合流部分の境界条件について, 本流と支流の平均値をとるようにする.

3.2 解法

上記の方程式をフラクショナル・ステップ法を用いて解く. Case1 は, $\Delta t = 0.025$, 計算ステップは 5,000 回とし, Case2 は, $\Delta t = 0.0125$, 計算ステップは 5,000 回とした.

また, 水面変化を考慮するため, 表面流速によって水面の高さが変化するようにする (自由表面).

$$Z^{n+1} = Z^n + w\Delta t$$

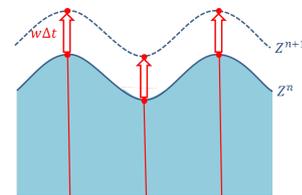


Fig.3.2: 自由表面の図

4 結果と考察

4.1 流れ場

Fig.4.2.1 から Fig.4.2.4 は, Case1 と Case2 における合流部付近の流れ場をそれぞれ示したものである. 矢印は流速ベクトルを表す.

Case1 では, 本流の流速が支流と同じ場合, 合流以降の流れにおいて乱れることなく自然に合流していることがわかる. 一方, 本流の流速が支流より大きくなると, 合流部における支流の左岸で逆流の発生が確認できた. 本流と支流の速さの違いによって逆流が生じたと考えられる. また, 速さの違いによって合流以降の流れにも乱れが生じていることがわかる.

Case2 では, 流速の比率がいずれの場合も合流部において本流と支流の間に壁のような流れが生じ, 支流の流速が著しく小さくなっており, 流れがせき止められていることがわかる. 流速の比が 1:1 の場合にも起きていることから, この現象は合流角が大きい (直角である) ことによるものであると考えられる. また,

Case2 においても Case1 と同様に支流において逆流の発生が確認できた。さらに、合流後の流れの外側において流速が大きくなっている。本流のモデルはカーブを描いており、遠心力が働くために外側の流速が大きくなる。そのため、カーブの外側と内側で流速の差が大きくなっていると考えられる。今回は平行と直角という極端なモデルを用いたが、合流角の大きさもバックウォーター現象や氾濫を起こす要因となるのではないかと考えられる。

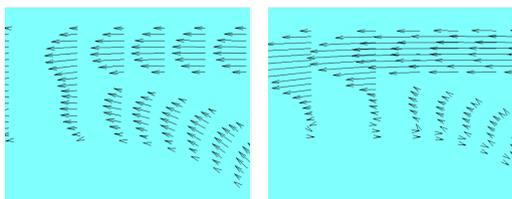


Fig.4.1.1: (左) Case1 における流れの様子 (1:1)

Fig.4.1.2: (右) Case1 における流れの様子 (2:1)

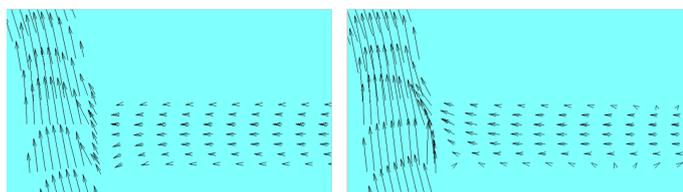


Fig.4.1.3: (左) Case2 における流れの様子 (1:1)

Fig.4.1.4: (右) Case2 における流れの様子 (2:1)

4.2 水面の変化

Fig.4.2.1 から Fig.4.2.4 は、Case1 と Case2 の最終の水面の高さをそれぞれ表したものである。色が水面の高低を表していて、それぞれの流れの中で最も赤色に近づいたところは水面が最も高く、最も青色に近づいたところは水面が最も低い、ということを表す。ただし、この表示は相対的なものであり、絶対値を用いたものではない。

Case1 と Case2 のどちらにおいてもカーブの外側と内側の水面の高さの差が非常に大きくなっている。このことは、4.1 で述べた通り、遠心力が働くために外側の流速が大きくなることによるものだと考えられる。また、Case1 の合流部において水面が高くなっていることが確認できる。Case1 の支流において支流の流入部における流速は変わっていないにも関わらず、1:1 よりも 2:1 の場合の方が支流の前半部分において水面が高くなっている。これは Fig.4.1.2 で確認できた逆流の影響であると考えられる。Case2 においては、逆流の影響は見受けられなかった。

Fig.4.2.5 は Case2 の合流部における支流の水位の変化を数値化し、グラフに表したものである。測定箇所は Fig.2.1 に表した地点 A である。本流の流速が大きくなるにつれて、合流部における支流の水位が上がりにくくなっていることがわかる。どの比率の場合もステップ 5000 では同じくらいの水位に収束していることから、4.1 節にて確認された逆流が発生したこと

によって本来 (1:1 の場合) のように合流するまでに時間がかかるためだと考えられる。

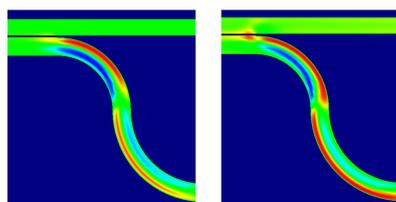


Fig.4.2.1: (左) Case1 における水面の様子 (1:1)

Fig.4.2.2: (右) Case1 における水面の様子 (2:1)

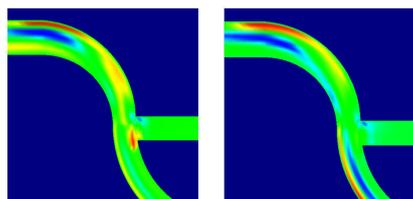


Fig.4.2.3: (左) Case2 における水面の様子 (1:1)

Fig.4.2.4: (右) Case2 における水面の様子 (2:1)

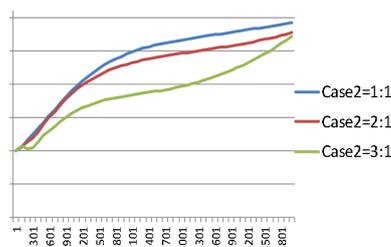


Fig.4.2.5: Case2 の合流部における支流の水位変化

5 まとめと今後の課題

河川の合流部の流れや河川の形状に着目し、流れのシミュレーションを行った。流速の大きさや水面の高さは、カーブにおける遠心力によってカーブの外側と内側で大きく変化することから、カーブの外側において堤防の高さを高くしたり強化することが、増水時に氾濫を防ぐために効果的と考えられる。また、合流角が大きく、本流の流速が支流よりも大きいような川の場合には、本流の流れに支流がせき止められて流速が小さくなったり逆流が発生しやすいことがわかった。川の合流角を小さくしたり合流部の川幅を広げるような工夫をすることで、このような現象が防げると考えられる。

今後は、河床変動を考慮したり、川幅や合流角を変えて様々なパターンで氾濫やバックウォーター現象の起きやすい条件を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 「災害・防災情報」
<https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai191211.html>
(最終アクセス: 2020/01/24)