

河床変動を考慮した合流河川のシミュレーション

小畑 夕香 (指導教員:河村 哲也)

1. 背景と目的

日本の河川は河床勾配が急峻で、流水の変動が大きいと、しばしば河床変動を繰り返している。河川の河床変動は、自然生態系の環境において重要な要素である。また、災害という形で私達の生活にも大きく関係している。近年、異常気象により、想定している規模を超える大雨、洪水がしばしば起きている。特に、山地河川の河床は、巨礫から微細粒な土砂までの幅広い粒度分布を有しているため、災害防止や環境保全を考慮すると、これらを加味した河床変動の予測は今後の大きな課題となっている。そこで本研究では、合流河川の河床変動に着目し、河床変動が起きる河川の流水を数値解析することを目的とする。

2. モデル化

本研究では、河床変動の起きる河床は、一様な土砂を敷くことにする。河床の地形は図1のようになっている。これは札幌近郊の豊平川と厚別川の分流地点付近の、実際の地形を用いたものである。

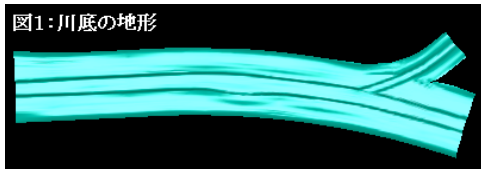


図1: 川底の地形

3. 数値計算法

3.1 基礎方程式

河川の流れは非圧縮性流体とみなせるので、連続の式 (i) と非圧縮性ナビエ・ストークス方程式 (ii) を支配方程式として解析する。

連続の式:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots (i)$$

ナビエ・ストークス方程式:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad \dots (ii)$$

(\mathbf{u} : 速度ベクトル, t : 時間, p : 圧力, Re : レイノルズ数, \mathbf{g} : 重力加速度, \mathbf{k} : z 方向の単位ベクトル)

また河床の土砂は、各地点の流速に従った量が移動するため、土砂輸送量ベクトルは (iii) (iv) で求められる。

$$\mathbf{q} = b_1 \frac{\rho_0}{g} |\mathbf{u}_*|^2 \mathbf{u}_* \quad \mathbf{q} = (q_1, q_2) \quad \dots (iii)$$

$$\mathbf{u}_* = \sqrt{v \frac{d\mathbf{u}}{dz}} \quad \dots (iv)$$

(q : 土砂輸送量, b_1 : 比例定数, ρ_0 : 空気密度, \mathbf{u}_* : 摩擦速度, v : 動粘性率)

さらに土砂面上の微小面積における砂の質量保存則を表す式 (v) から土砂面に垂直な方向の高さが求められる。

$$\rho_s \frac{dh}{dt} = -\frac{dq_1}{dX} - \frac{dq_2}{dY} \quad \dots (v)$$

(ρ_s : 土砂の密度, h : 土砂面に垂直な方向の高さ、

X, Y : 土砂面に平行な面の局所座標)

よって、水流によって流された後の新しい河床の形状を決定することができる。

外力は重力のみとし、(i) (ii) を MAC 法で解き、圧力のポアソン方程式は、SOR 法を用いて解いた。その後、時間ステップごとに (iii) (iv) (v) を用いて河床の形状を変化させる。

3.2 差分法

3.1 の基礎方程式は、時間依存性のある一般座標の座標変換を用いて変換したあと、差分法による近似計算を行う。時間に関する偏微分は一次精度の前進差分を、空間に関する偏微分は二次精度の中心差分を用いる。

3.3 計算格子

格子数は、 $121 \times 75 \times 11 (=99,825)$ とし、川の長さ方向は x 、川の幅方向は y 、水深方向は z とする。また、 x, y, z 平面すべて不等間隔格子を生成する。

下図2は川を上空から見たときの水面での様子で、図3、4は、川の横断面における格子である。ただし、水深方向に非常に薄くなっているため、表示では水深方向は5倍に拡大してある。

図2: 川全国

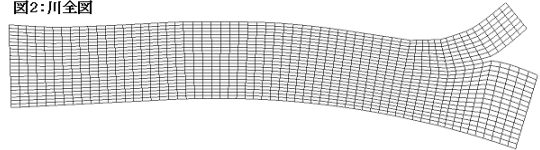


図3: 川の中端地点

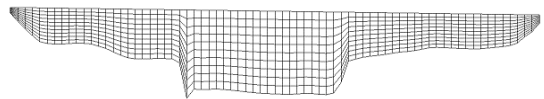
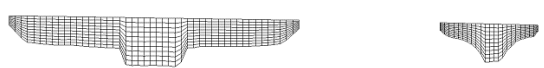


図4: 川の右端地点



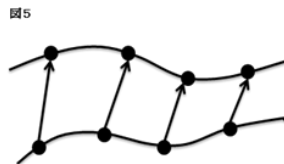
3.4 自由表面

流水の表面は形状変化する、すなわち境界(水面)が自由に運動するので自由表面として取り扱う。

自由表面上の流体粒子は、自由表面が変形しても自由表面上にあるため、これらの粒子がつくる面が常に自由表面になる。また、自由表面の形状は時間的に変化する、時間ステップごとに格子を作り直す必要がある。(格子の再分割)

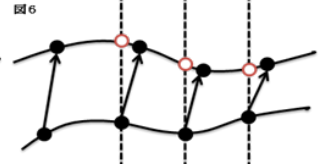
時間ステップを1つ進めたとき、図5のように格子点が移動したとする。このとき、図6のように、格子を移動させた後、移動前の x 一定の格子と、移動後の隣接格子点を結ぶ直線との交点を新しい交点とし、 x 方向の格子幅は時間にかかわらず一定に保つ。また計算においては通常格子を用いる。

図5



Δt 後の自由表面

図6



○: 新しい格子点

4. 計算結果

<初期条件>速度: x 方向に定数

圧力: 静水圧

<境界条件>速度: 自由表面、川底ともに一つ内側の格子点の値

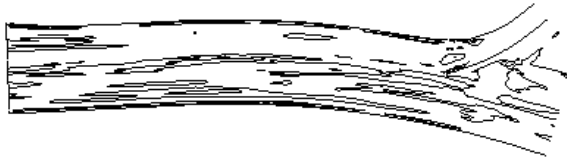
圧力: 自由表面は 0、川底は gH (H : 水深)

～計算ケース①～

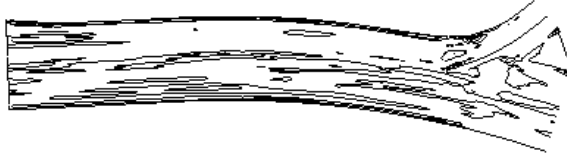
$\Delta t = 0.1$ ととり、初めの 1000step は川底の土砂は流されず、1000step 以降、水流の影響を受けて河床変動が起きるようにした場合 (計算 step 数: 5000 と 10000 の結果)

・川底の変化量(等高線図)・

7700step



10000step



川底の土砂は、合流後では川の両側で変動が大きい。図でははっきりしないが、川の外側(図では上)では削られ、内側(図では下)では土砂が積もっている。また、河道(本来の川すじ)でも変化がある。また、川底の地形で、少し窪んでいるところや、川幅の両端付近でも少し土砂が盛り上がっているところがある。削られ方は、ほぼ一様であることが分かる。

・水面の様子(等高面図)・

4000step



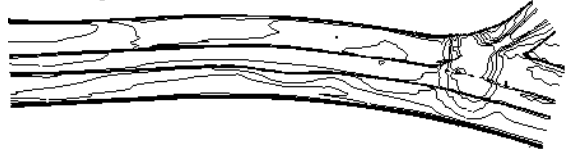
6000step



8000step



10000step



時間がたつにつれて、水面に河道の形状が現れてくる(河道部でへこむ)ことがわかる

・水面の流速ベクトル・

1000step



3500step



9000step



流速は、合流地点ではの外側(図では上側)で少し乱れているがこれは地形の影響と考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究において、河床変動を考慮した合流河川の流水の様子、川底の削れる様子をシミュレーションすることができた。このことから、流れが速いところでは、川底の土砂がより多く削られ、流れが遅いところでは、土砂はあまり削られないことが分かった。今後は河床変動の起きる川で、橋を架けるなどして、円柱(橋脚)を取り囲むような渦(馬蹄形渦)ができる洗掘現象を考慮した数値解析を行いたい。また計算領域を増やして、数値解析を行いたい。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、ご尽力くださった河村先生、諸先輩方に深く感謝いたします。

7. 参考文献

- [1] 河村哲也: 河川のシミュレーション! インデックス出版 2004
- [2] 河村哲也: 流体解析 I 朝倉書店 2006
- [3] 河村哲也: 数値シミュレーション入門 サイエンス社 2006
- [4] 中村陽子: 合流河川における水面変化のシミュレーション お茶大理学専攻 2008 年度修士論文
- [5] 秋保美幸: 奇岩生成過程の数値シミュレーション お茶大理学専攻 2008 年度修士論文