

平成 16 年中越水害に対する阿賀野川河口砂洲のフラッシュの再現に関する研究

水工学研究室 久保田 雅哉
指導教官 細山田 得三

1. はじめに

河口砂洲におけるフラッシュ現象とは、洪水などの大流量によって砂洲が沖へ流される現象である。治水安全上、フラッシュ現象の動態を把握することは非常に意義があることだと考えられる。とくにフラッシュ現象とは短期的に起こる現象であり、観測での動態の把握が困難である。そのため数値計算によるシミュレーションが一般的に行われている。

平成 16 年の中越水害は、阿賀野川において河川流量 7000m³/s を越える大流量を記録した。本研究ではその洪水を対象とし、以前までの実地形を用いた平面 2 次元の数値計算によるシミュレーションモデルを大流量に対応させると同時に、阿賀野川河口域の砂洲のフラッシュの動態をより正確に再現することを目的とした。

2. 研究概要

(1) 基礎方程式

河川の流れを平面 2 次元として表現するために連続式、運動方程式として以下のものを使用する。この方程式を河川の形状に応じた一般曲線座標に変換し、有限堆積法により離散化している。またか小変動には関根、岩垣の掃流砂および浮遊砂の理論を用いた。式(4)に浮遊砂の拡散方程式を示す。掃流砂と浮遊砂の理論から求められた掃流砂量、基準面濃度、砂の巻き上げ速度を式(5)に示す土砂の連続式に代入することで地形変動を表した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} \\ & = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u'v'} h \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} \\ & = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{v'^2} h \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} \right) = -\frac{hw_0^2}{\varepsilon_{sz}} c + w_0 E_s + \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial ch}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{sy} \frac{\partial ch}{\partial y} \right)$$

$$(1-\lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) \quad (5)$$

$$= - \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{Bx}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{By}}{J} \right) \right) + w_0 \times (C_a - E_s)$$

ここに、 t は時間、 x, y はデカルト座標系による空間座標、 ξ, η は一般座標系による空間座標、 $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M & N \\ P & Q \end{pmatrix}$ は座標変換マトリクス、 J は座標変換ヤコビアン、 u, v は x, y 方向の水深平均流速、 U, V は流速ベクトルの反変成分、 M, N は x, y 方向の流量、 g は重力加速度、 h は水深、 ρ は水の密度、 z_s は基準面からの水位、 τ_{bx}, τ_{by} は x, y 座標系の底面せん断応力成分、 $-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2}$ は x, y 座標系での水深平均レイノルズ応力、 c は土砂の濃度の水深方向平均、 w_0 は砂粒子の最終沈降速度、 $\varepsilon_{sz}, \varepsilon_{sy}$ はそれぞれ z 方向、 y 方向の砂の拡散係数、 Z_b は河床高、 λ は砂の空隙率、 q_{Bx}, q_{By} は x, y 方向の掃流砂量、 C_a は基準点濃度、 E_s は砂の無次元巻き上げ速度である。

(2) モデルの改良点

水際境界条件の追加

図 1 に水際での流量計算の概要図を示す。横断方向(x 方向)に加え、砂洲前面のような縦断方向(y 方向)の水際でも計算するようにした。ここに、 Q は y 方向の流量、 h は水深、 h_* は水陸判定水深である。

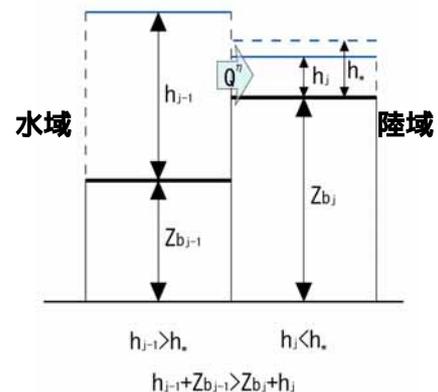


図 1 水の乗揚げを評価する境界条件

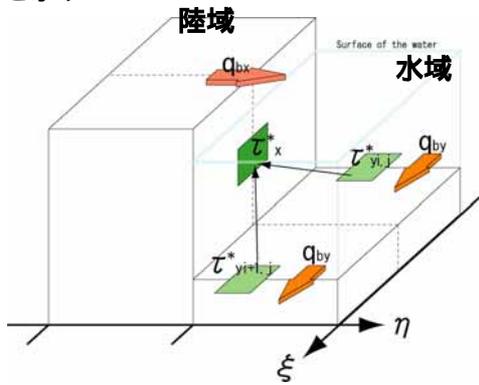
横断方向掃流砂量の追加

主流速と斜面角に伴う掃流砂量の計算を追加した。式(6)にその定義式を示す。ここに、 q_{bx} は主流方向の掃流量、 q_{by} は主流速と斜面角に伴う掃流砂量、 τ^* は無次元掃流力、 τ_c^* は無次元限界掃流力、 ω は斜面角である。

$$\frac{q_{By}}{q_{bx}} = \frac{v}{u} + \frac{1}{\mu_d} \sqrt{\frac{\tau_c^*}{\tau^*}} \tan \omega \quad (6)$$

壁面での侵食の仮定的追加

水際壁面での簡易的なせん断力を仮定した。これにより陸域からの砂の移動を評価する。図2にその概要図を示す。



$$\tau_x^* = (\tau_{y,i,j}^* + \tau_{y,i,j+1}^*) / 2$$

図2 壁面でのせん断力

土砂移動の改善

基準点濃度 C_a は式(4)より算出しているが、この式を一般化する際に生じていた問題を改善することで、巻き上げ、沈降のバランスが取れるようになった。

(3)初期条件

以下の図3, 図4に初期条件となる地形, 流量, 水位を示す。

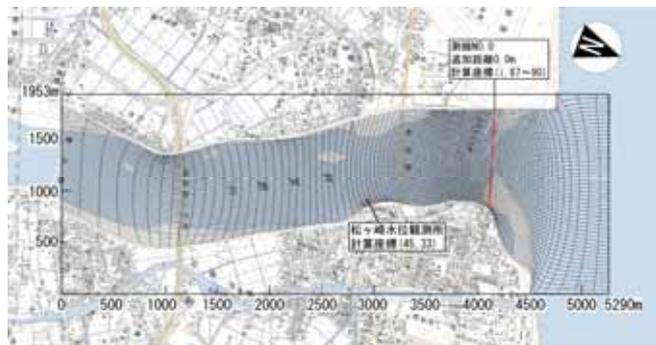


図3 計算地形

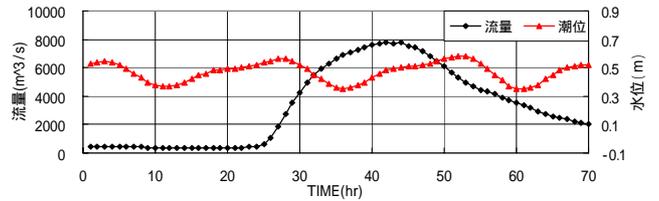


図4 初期流量, 潮位

3. 結果

図5は砂州がフラッシュする様子を流量の経時変化とともに示したものである。図のように、洪水流が到達するまでは砂州に変化はないが、洪水流到達とともにフラッシュが開始し、流量の増加につれ土砂移動が進行する。さらに流量がピークに達すると、フラッシュは終了し、洪水流の通過とともに水位も減少していく。このように洪水時の一連の河口部の様子が再現できていることがわかる。

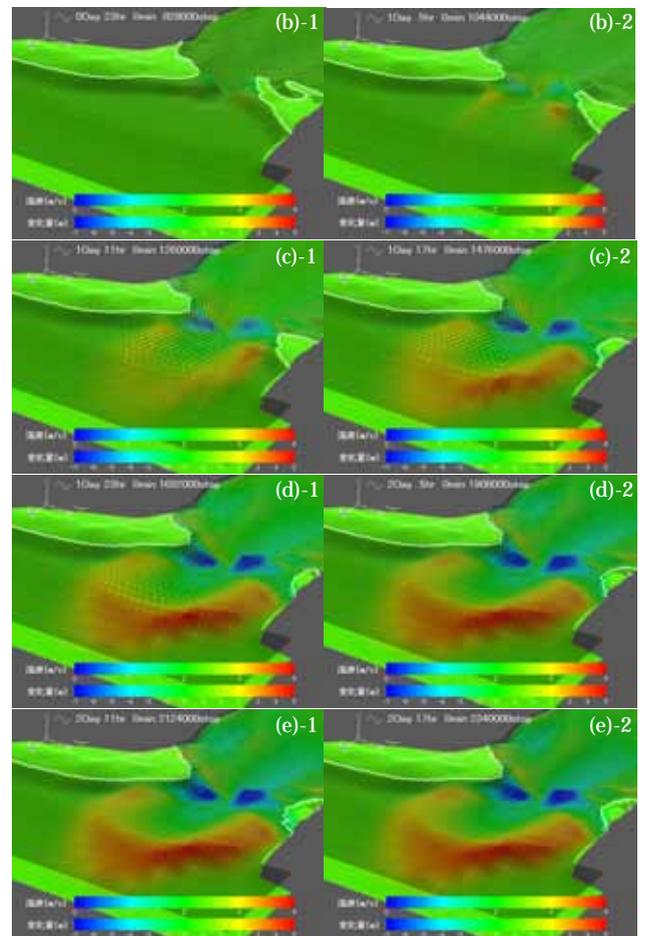
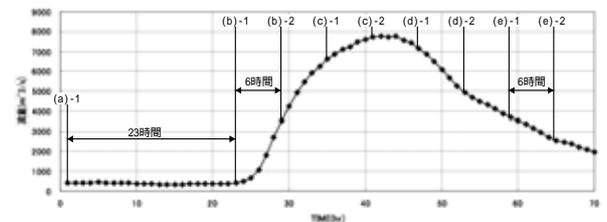


図5 流量と河床高変化量の経時変化

図 6 はフラッシュ後の地形を表した計算結果である。色は河床高変化量を表し、点線がフラッシュ後の等深線、実線がフラッシュ前の等深線で点線と同じ高さを表す。図を見ると砂州の頂点が削れ、河口テラスに堆積していることがわかる。

次に実測との比較を行う。図 7 は中越水害後に測深された河口テラスのコンター図である。計算、実測の両方とも砂州の裏側に堆積があることから、堆積傾向は一致している。また、計算結果の左岸側では標高約 -1m に対し、実測値では -0.8m と標高差が 0.2m となったことから、定量的に見ても満足の行く結果であるといえる。

次に砂州の汀線を比較する。図 8 の赤線がフラッシュ後の空中写真より目視した砂州の汀線、青が計算結果の汀線である。図より比較的砂州の形状は近似しており、実際の現象と近い結果となった。しかし、左岸側はやや侵食過多右岸側はやや侵食不足となった。

これを踏まえて、横断図の比較を行う。図 9 は図 3 の赤線の位置での、実測値と計算結果を上流側から見た横断図である。赤線が実測値、茶色の線が計算終了時の河床高であり、右岸側を見ると赤い線と、茶色い線が重なっていることから、定量的に見ても近似しているが、左岸側では大きく差が出ている。これは、河床高が観測された日が計算終了時のものではないために、沖からの漂砂の影響などで河床が上昇したものと考えられる。また、初期地形が平成 12 年のものを使用しているため、河床形状の誤差があったものと考えられる。

最後にフラッシュの有無による水位変動の比較を図 10 に示す。フラッシュがある場合、痕跡高と水位の差は、最大で 0.5m 程度となったが、ほぼ同様の傾向を示した。また、フラッシュがない場合は、砂州の上流側で水位が堤防高を越え悦流の危険性があるが、フラッシュする場合は悦流の危険はないという結果になった。

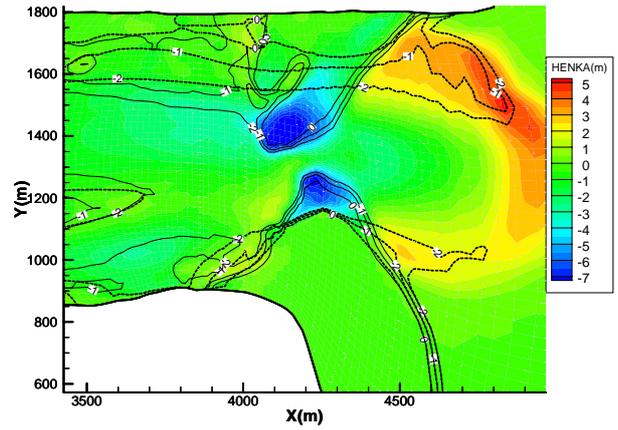


図 6 地形の変化

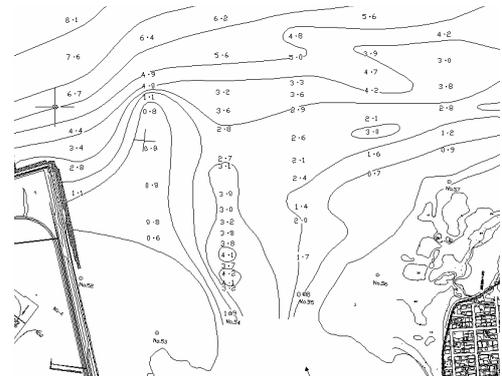


図 7 H16 フラッシュ後観測河床高



図 8 計算結果と空中写真の砂洲汀線比較

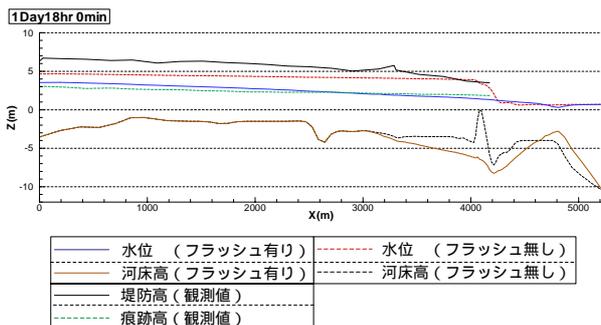


図 10 ピーク流量時の縦断図と痕跡高観測値

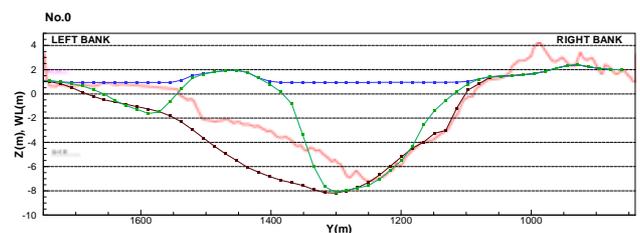


図 9 計算結果と観測値の横断図比較

4. まとめと考察

最後に今回作成した数値モデルについての考察と今後モデルを改良するにあたり、課題を示す。本研究で作成したモデルは、佐藤(2005)によって構築された一般座標系平面 2 次元モデルを基本としている。このモデルは阿賀野川にて平成 14 年に起こった約 $6000\text{m}^3/\text{s}$ の出水に対する河口砂州の動態を把握するため作成されたものであり、今回はさらにこのモデルを、メッシュの細分化と 7.13 水害の大流量に対応させるため、水際境界条件、砂の移動計算部分に改良を加えた。結果としては、満足のいく再現モデルが構築できたが、その過程で計算が不安定だったのは水際での土砂移動である。前述の通り、土砂移動は掃流力に依存し、掃流力は水深、流速に依存する。水深が浅い箇所でも 1 ステップでも極端に大きい流速が出ればそのメッシュは地盤高が大幅に減少してしまうことになる。以前までのモデルはそのような現象が砂州側面で発生していたが、今回水際境界条件の見直しをしたことで極端な河床変化はなく、計算が安定した。また、浮遊砂の理論では、土砂の沈降と巻き上げ速度との関係の見直しを図った。使用した理論式は、以前のモデルと同様、基準面濃度を掃流力に依存するとした Einstein の式である。実際モデルで計算する際は、一般座標化して用いるのだが、それを再計算することで、巻き上げと沈降のバランスを改善することができた。

次に、図 11 に最大流量時の浮遊砂の有無を示す。赤色の部分で浮遊砂が存在し、青色の部分で浮遊砂量は 0 である。砂州移動計算部分は Einstein の式を用いているため、掃流砂量が発生しないメッシュでは浮遊砂が発生しないということになる。すなわち図の青色部分で掃流砂は発生していない。上流端から土砂を流入させるとすれば、まず掃流砂が発生していないメッシュの基準面濃度が増加する。しかしこのメッシュでは巻き上げが起こっておらず、土砂は図の赤丸の場所で堆積する一方となる。そのメッシュに掃流力が存在するかどうかは無次元限界掃流力と無次元掃流力を比較して決めるが、無次元限界掃流力は粒径に依存するとした岩垣の算出方法によれば、粒径が小さくなるほど土砂移動は起こりやすいということになる。水深が深く、流速が小さい上流部では細かい砂による掃流が発生し、その結

果土砂移動が起こるはずである。しかし、今回粒径は 0.25mm の均一粒径で計算を行っており、ある程度流速が大きく、水深が浅くないと掃流力が限界掃流力を上回らないため、土砂は上流部では移動しないという結果になった。したがって、混合粒径での計算モデルの構築が必要である。

また、再現計算において正確な現地観測データは必要不可欠である。いたるところに誤差を含んでいてはモデルの検証ができなくなってしまう。今回の目的はフラッシュ形態の把握であり定量的な評価はしないが、今後定量的に評価する場合は、今回の計算ではデータが足りないといっているだろう。地形変動には粒径や Manning の粗度係数が大きく関わってくる。そのため、それらの場所ごとによる分布や、階層別にした粒径で計算することができれば、より実現象に近いシミュレーションができるはずである。しかしこのようなパラメータはコスト面から考えても簡単に観測できるものではない。よって、確実性の高い境界条件などデータの改善や、各種パラメータの評価方法を考える必要がある。

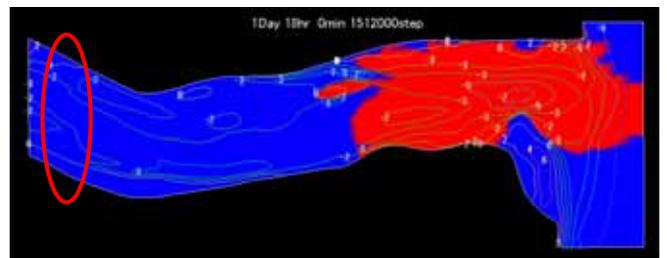


図 11 浮遊砂の有無

5. 参考文献

- 1) 細山田 得三, 佐藤 啓明: 阿賀野川河口砂州のフラッシュ現象に関する数値解析
- 2) 関根 正人: 移動床流れの水理学, 共立出版
- 3) 岩垣 雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp1-21, 1956
- 4) 土木学会 水理委員会: 水理公式集 [平成 11 年版], 社団法人 土木学会
- 5) 細田 尚, 長田 信寿, 村本 嘉雄: 移動一般座標系による開水路比定常流の数値解析, 土木学会論文集, No.533/ -34, pp53-56, 1993