

阿賀野川河口砂州のフラッシュ現象に関する数値解析

長岡技術科学大学大学院 佐藤 啓明
指導教官 ○細山田 得三

1. はじめに

一般的に河川における河口砂州は流下能力の低下を招き、出水時に危険である。一方で通常時は塩水遡上を低減する側面もあるが、それにもまして出水時の危険に対する懸念が大きい。大流量による出水時には、河口砂州が水によって流され河口が拡大する。これをフラッシュ現象と呼ぶ。例として図-1に平成16年新潟・福島豪雨のときの阿賀野川におけるフラッシュ現象を出水の前後の航空写真により示す。このフラッシュ現象により河口砂州の流下能力は拡大する。治水安全上、出水時にはフラッシュ現象により、河口幅の拡大、流下能力の拡大が必要であるといえる。

本研究の対象である阿賀野川においては、過去の出水時に大規模なフラッシュ現象が確認できたケースとそうでないケースがあり、十分に安全な状態とは言いきれないのが現状である。

そこで本研究では河口砂州の適正な管理のキーワードとなるフラッシュ現象を対象として、実地形を用いた2次元の数値計算によるシミュレーションにより、フラッシュ現象の定量的な把握、および危険性の比較検討などを行うことを目的とする。

2. 研究概要

(1) 基礎方程式

本研究では一般座標系による平面2次元の流れと砂の移動の計算を行った。河川の流れを表現するために連続式、運動方程式を使用した。式(3)、(4)、(5)に一般座標系に変換した連続式、および運動方程式



平成16年5月撮影(出水前) 平成16年7月撮影(出水後)

図-1 阿賀野川におけるフラッシュ現象の例

を示す。また河床変動には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。

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、 $\xi_x, \eta_x, \xi_y, \eta_y$ 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 は砂の何巻き上げ速度である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VM}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho J} + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{N}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UN}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VN}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho J} + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \quad (3)$$

$$h \left\{ \frac{\partial c}{\partial t} + u \left(\xi_x \frac{\partial c}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) + v \left(\xi_y \frac{\partial c}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\}$$

$$= - \frac{hw_0^2}{\varepsilon_{sz}} c + w_0 E_s$$

$$+ \xi_y \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\varepsilon_{sy} \xi_y \frac{\partial ch}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\varepsilon_{sy} \eta_y \frac{\partial ch}{\partial \eta} \right) \right\}$$

$$+ \eta_y \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\varepsilon_{sy} \xi_y \frac{\partial ch}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\varepsilon_{sy} \eta_y \frac{\partial ch}{\partial \eta} \right) \right\}$$

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

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

(2) 計算条件および境界条件

計算領域は阿賀野川河口周辺とし、図-2に河床高コンター(平成12年2月測深)と共に示す。座標系は平面2次元一般座標系、格子は流下方向に72格子、横断方向に15格子とした。また境界条件として図-3に示すように上流端に平成14年の台風6号における流量、下流端に水位を与えた。またマンニングの粗度係数は0.032を使用した。計算はフラッシュ現象を想定しないケースと、フラッシュ現象を想定し掃流砂と浮遊砂によって再現したケースを行った。

3. 計算結果および考察

(1) 結果の検証

本研究で行った計算について、計算がどの程度実現象に適合するのかを検証しなければならない。本研究の目的である、危険性の検討に必要な重要な要素は水位である。そこで図-4に示す松ヶ崎水位観測所の水位と計算値を比較することとする。計算は下流端の潮位を図-3で与えたものを増減させるなどして数パターン行い、その中で最もよく合う基準となる図-3の水位より+25cmのケースを示した。全体的によく適合しているように見える。またピーク時の水位があっていることもわかる。また図-5に横軸に水位の観測値、縦軸に計算値をとった。これより得られた線形近似は傾きも45°に近く、原点付近を通っていることから計算値と観測値の相関が良くあらわれており、水位に関する計算の適合性がよいといえる。そこで次節からはこの計算例をもとに議論することとする。

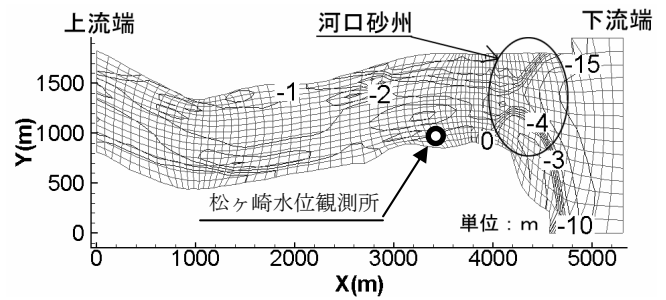


図-2 計算領域と河床高コンター

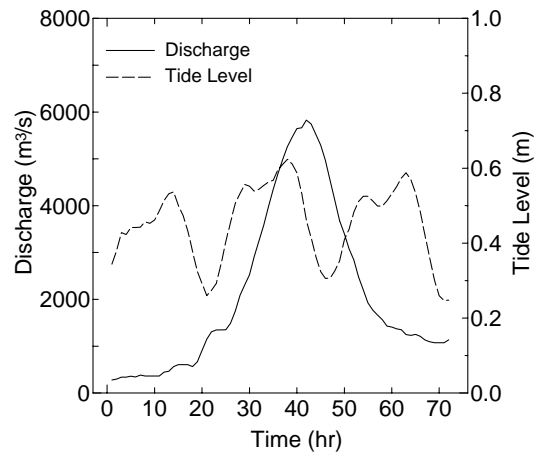


図-3 境界条件

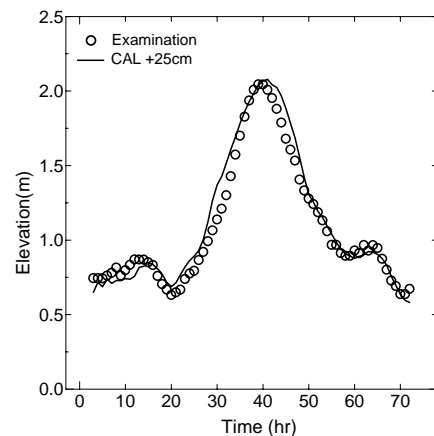


図-4 松ヶ崎水位による計算値と観測値の比較

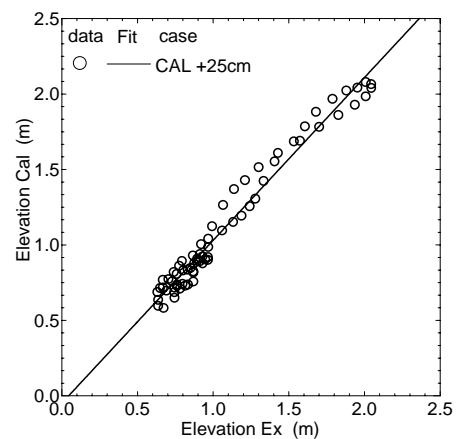


図-5 観測値と計算値の相関

(2) 流速について

図-6 はピーク流量時のフラッシュの有無による流速の比較である。茶色の部分は陸域で、河口砂州である。また青や水色は水域を表し、水色から青になるほど水深が深いことを示す。左側が上流側、右側が下流側であり、上の図はフラッシュがない場合、下の図はフラッシュがある場合である。フラッシュが無い場合は、流量に対して十分な河口断面をとることができない。そのため堰上げがおこり砂州の上流側はフラッシュがある場合に比べ、水域部が多い。また流速に関してはフラッシュしない場合は河口の流下断面がフラッシュする場合に比べ小さいので流速が大きくなる。逆にフラッシュする場合はフラッシュしない場合に比べ十分は流下断面をフラッシュによって得られるので水位上昇も少なく、流速もフラッシュしない場合に比べ大きく緩和される。

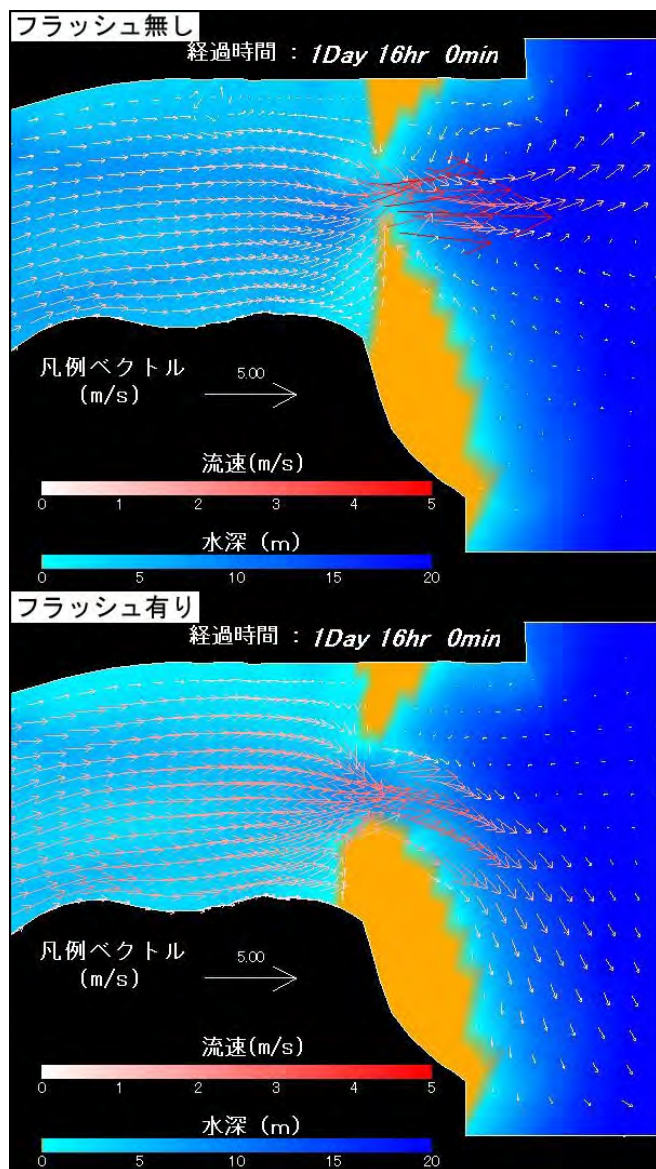


図-6 フラッシュの有無による流速の比較

(3) フラッシュ現象による地形変化

図-3 にはフラッシュ現象による地形変動の時間的変化を示す。図の側上が上流端、下側が下流端である。また高さは地形の標高を表し、色は元の地形からの地形の変化量を示している。黄緑色が変化量 0 を示している。また青色は地形が削られたのを意味し、赤色は堆積を示す。これを見ると経過時間がたつにつれて、河口部で砂州が削れて行く様子がわかる。砂州は中央部に削れはじめ、その削れた砂は、砂州を出たところあたりに堆積しはじめる。砂州部分は河口幅が狭いため流速が大きくなり地形は削られる。また河口よりやや下流部は砂州部を出たところであり、河口幅も広がり、水深も低くなるため、流速が低下する。そのため砂州部は地形が削られ、砂州を出たところに砂が堆積する。

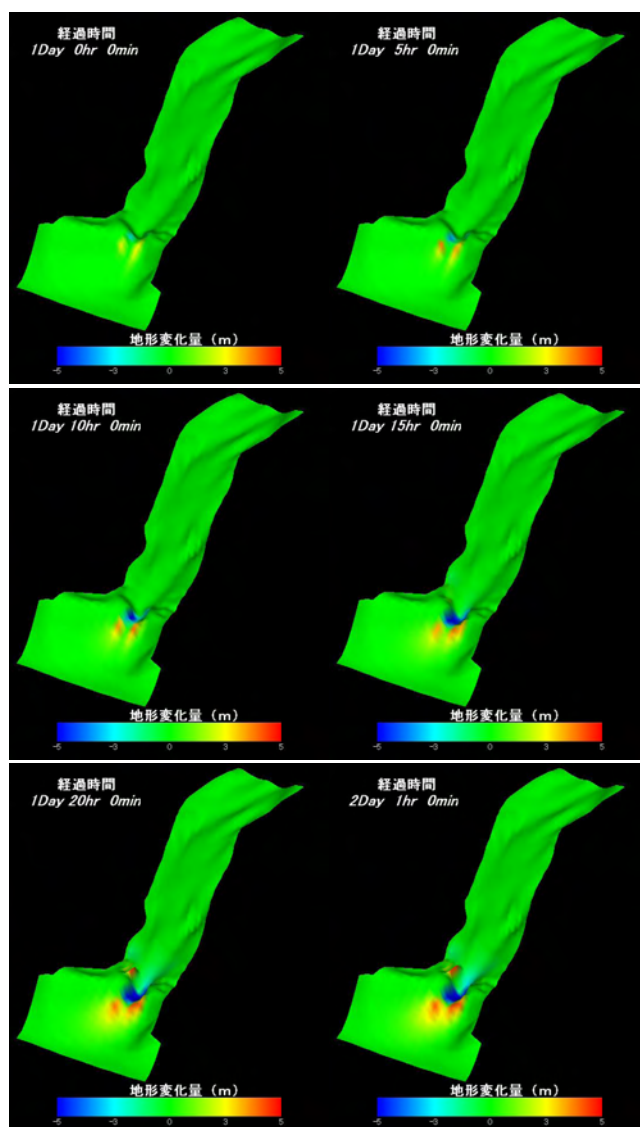


図-7 フラッシュによる地形変動の時間変化

(4) フラッシュ現象の水位への影響

図-8 は河床高および水位の時間的変化をフラッシュ現象がある場合とない場合で比較した図である。左が上流側、右が下流側となっており、点線がフラッシュを想定した場合、実線はフラッシュがない場合を表している。また青線が水位、赤線が地形、黒点線が堤防の高さを表している。また上の図から下の方になるにつれて時間の変化を表している。経過時間がちょうど1日のときはまだ地形の変化がおこっていないため、フラッシュする場合としない場合に水位の違いは見られない。しかし時間がたつにつれて、徐々に地形に変化が見られるようになる。これは流量の増加に伴って、砂州部での流速が大きくなるからである。地形は砂州部では大きく削られる。そして砂州部よりやや下流側に堆積する。砂州部は河口幅が狭いため、流速が速いから地形は削られ、それよりやや下流では河口幅が広くなり、水深も深くなるため、流速は遅くなるため、砂がそこに堆積することとなる。またフラッシュがある場合には砂州が削れることにより、十分な流下断面を確保できるが、フラッシュしない場合はそれがいないため、十分な流下断面を確保できず、堰上げが生じ、極端な水位上昇が見られる。経過時間が1日と15時間から20時間くらいの時間帯では、フラッシュしない場合は堤防高さと同様高さまで水位が上昇しているため、大変危険であることが分かる。この地点は、左岸側は空港、右岸側は住宅街となっており、大きな出水時には注意が必要である。このようにフラッシュが無い場合は大変危険であることがわかる。ゆえに安全性という観点からフラッシュ現象は重要である。

(5) 土砂移動モデルの問題点

フラッシュを表現するのに掃流砂と浮遊砂の理論を用いて計算を行った。しかしながら洪水時において現在の浮遊砂の計算手法などは十分とはいえない。本研究の目的上はこの程度の計算でよいが、砂州の変化を適正に知りたい場合はその部分を今後検討する必要がある。またフラッシュ現象についても掃流砂と浮遊砂の理論だけでは表現しきれないとは考えにくい。その点についても今後検討の必要がある。

4. まとめ

本研究では、地形変動の傾向について把握することができた。またフラッシュがある場合と無い場合でおよそ2mの水位差が見られ、フラッシュが無い場合には堤防高さと同様高さまで水位が上昇することが分かった。その付近には左岸側は空港、右岸側は住宅街であり大変危険である。それにより、フラッシュ現象が水位に与える影響は大きく治水安全上、重要であるということが明らかになった。

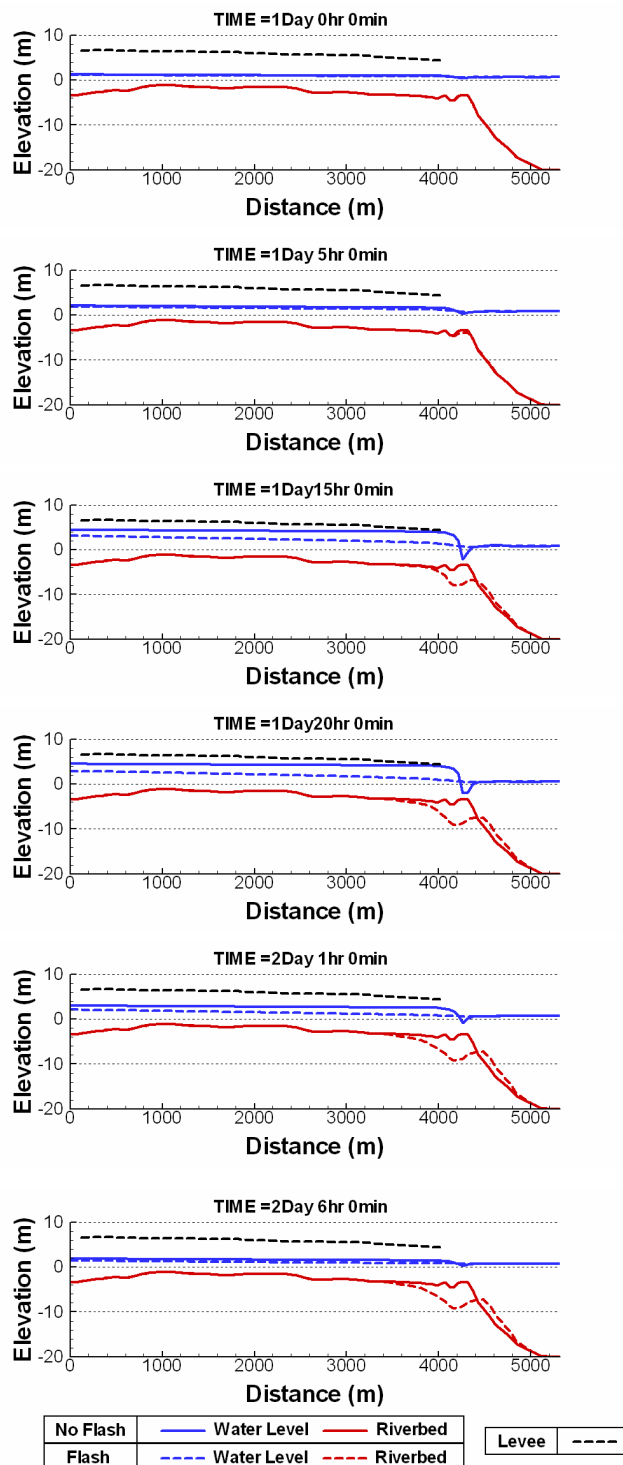


図-8 フラッシュの有無による河床変動と水位