

洪水時における阿賀野川河口砂州の フラッシュ現象の再現に関する研究

A NUMERICAL STUDY FOR FLASHING OF SANDBARS BY FLOOD IN THE AGANO RIVER MOUTH

細山田得三¹・佐藤啓明²・野田 猛³・酒井 優⁴・酒向秀典⁵
Editorial COMMITTEE, Japan SOCIETY and River ENGINEERING

¹正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

²工修 五洋建設

³国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所長

⁴国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所調査課長

⁵国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所調査係長

Flashing phenomena of sandbars at river mouth are crucially important for safety against flood disasters in the down river city area. Seasonal sandbars are formed in the Agano river mouth which is located adjacently to Niigata city in Japan. In this study, a series of two-dimensional numerical simulations are carried out to understand fundamental mechanism of flashing of sandbars in the Agano river mouth. Governing equations of the numerical model are the wave equations based on the shallow water approximation. Equations of wash load and bed material load are added to the wave equations to calculate the deformation and flashing of the sandbars. General Curvilinear Coordinate system is adopted to treat arbitrary shape of the river. Temporal change of the surface level of the river shows good agreement between numerical results and real field measurements. Numerical results of flashing of the sandbar agree well with real field qualitatively. The safeness against flood disaster by flashing of sandbars in the Agano river mouth is evaluated numerically.

Key Words : flood, Sandbar, numerical simulation, wave, curvilinear coordinate, suspended load, bed material load

1. はじめに

河口においては河川の上・中流とは異なり海岸波動による沖から岸向きへの砂の移動作用によって砂州が形成されやすい¹⁾。河口砂州は河川の流下能力を阻害するため特に洪水時には治水安全上の障害となる。日本海に面した阿賀野川の河口は、導流堤など河川構造物が無く、冬季の風浪によって両岸から河口砂州が自然状態で発達し、夏季の出水時に問題が生じ易くなっている。しかし、大出水時には砂州がフラッシュされることが想定され、安全性が確保されることとなる。図-1に平成16年7.13新潟・福島豪雨のときに発生した阿賀野川河口砂州におけるフラッシュ現象の前後の航空写真を示す。この時の洪水では、堤防の天端上の越水による洪水氾濫などは見られなかった。洪水時の砂州による堰上げ水位上昇と砂州のフラッシュ、それに伴う水位上昇の緩和のプロセスを

理解することは河川管理上、極めて重要であるが、現在のところ十分解明されているとは言えない²⁾。その一例として阿賀野川においては経験的に流量が $6,000\text{m}^3/\text{s}$ を超えた場合、砂州が十分フラッシュされると考えられて



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

いたが、それに匹敵する流量が発生した平成14年の出水ではフラッシュが不十分であったと考えられている。わが国全体の河川整備状況を考えると、上流および中流域の整備の結果、末端に位置している河口部に負荷がかかる状況が生じており、河口砂州の管理技術の重要性が高まっている。

一方、河口砂州は希少動植物の生息地を形成する場合があることや、塩水遡上を低減する有利な面もあり、河口管理は難しい側面がある。近年の河口砂州に関する研究としては東北大学の研究者が文科省科学研究費「全日本比較河口学の展開」の共同研究者として全国に呼びかけ、日本全国各地における河口の動態について調査研究を行っている³⁾。例えば佐藤ら⁴⁾および真野ら⁵⁾は、波動や潮汐と河川流によって土砂の輸送（増加と減少）をモデル化し、それらがつりあった平衡状態での河口の開閉幅の算定を行っている。また、著者らの研究グループでは多方向不規則波の入射とそれに伴う海浜流の生成と河口砂州の生成に関する数値実験を実施している¹⁾

現在、著者ら（長岡技術科学大学と国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所）は、河川懇談会（座長：辻本哲郎名古屋大学教授）の援助を得て、阿賀野川の最適な河口管理に関する3ヶ年にわたる研究を行っている。その中において本論文では、阿賀野川の河口砂州の治水安全面の特性について検討している。その成果の1つとして本論文は平成14年の阿賀野川の出水時の河口砂州の変形および水位上昇の緩和特性を数値シミュレーションによって再現した結果について報告する。

2. 数値計算法

(1) 基礎方程式

本研究では一般曲線座標系による平面2次元非線形浅水波の流れと砂の移動の計算を行った。河川の水位変動と流速分布を表現するために連続式、運動方程式を使用した。式(1)、(2)、(3)に一般曲線座標系に変換した連続式、および運動方程式を示す^{6,7)}。これらの誘導には、直交デカルト座標に対して示された各方程式の独立変数を微分の連鎖則を用いて書き換え、その後、曲線座標に直交する成分を取り出すため曲線座標の法線ベクトルの内積をとって反変成分の方程式を求めた。また河床変動には掃流砂および浮遊砂の既往の理論を用いた^{8,9)}。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、すなわちフラッシュ現象を表現した。

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 は線流量ベクトルの反変成分、 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_B, q_{By} は掃流砂量ベクトルの反変成分、 C_d は基準点濃度 E_s は砂の巻き上げ速度である。レイノルズ応力の評価については平面2次元の $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた。

以上に示すようにフラッシュ現象を洪水流によって引き起こされる掃流砂と浮遊砂現象と仮定して既往の理論式を用いて計算を行った。しかしながら砂の安息角等を用いた側岸侵食のような現象を含んでいない。砂州の変化をさらに正確に把握するためには今後、側岸侵食を検討していく必要がある。フラッシュ現象についてここで示したような掃流砂と浮遊砂という現象の総和としてのみで表現しきれんとは考えにくい。特に底面からの砂の巻き上げフラックスの評価式の適用限界や特性が結果に大きく影響する。その点についても今後検討の必要がある。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

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

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

$$\begin{aligned}
& h \left\{ \frac{\partial c}{\partial t} + u \left(\xi_x \frac{\partial c}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) + v \left(\xi_y \frac{\partial c}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} \\
&= - \frac{h w_0^2}{\varepsilon_{sz}} c + w_0 E_s \\
&+ \xi_y \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\varepsilon_{sy} \xi_y \frac{\partial ch}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\varepsilon_{sy} \eta_y \frac{\partial ch}{\partial \eta} \right) \right\} \\
&+ \eta_y \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\varepsilon_{sy} \xi_y \frac{\partial ch}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\varepsilon_{sy} \eta_y \frac{\partial ch}{\partial \eta} \right) \right\}
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
& (1-\lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) \\
&= - \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{Bx}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{By}}{J} \right) \right) + w_0 \times (C_a - E_s)
\end{aligned} \quad (5)$$

(2) 計算条件および境界条件

計算領域は阿賀野川河口から約5kmの区間とし、図-2には河床高コンター(平成12年2月測深)と共に示す。座標系は平面2次元一般曲線座標系とし、格子は流下方向に72格子、横断方向に15格子とした。メッシュは、河川堤防のおよび上下流端の座標値を境界条件としたラプラス方程式を解くことによって発生させた。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、下流端に潮位による水位を与えた。またマ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) 計算結果の検証

本研究で行った計算結果について検証するために得られている実観測データは水位である。流量や流速については、数値計算と比較できるほどの信頼性の高い観測値を得ることは困難である。また、治水安全上の基本となる量は水位である。図-4に示す松ヶ崎水位観測所で測定された水位の時系列と計算結果の水位の時系列を比較した。下流端の境界条件としては、図3に示すような対象とした洪水時の新潟西港の潮位データを与えた。ただし、この観測点は阿賀野川河口とは位置が離れていることや潮位そのものに誤差が含まれている可能性がある。そこで図-3で示した値を増減させるなどして数パターン試行を行い、その中で最も水位がよく合う基準となる潮位データに25cmを加えることとした。図に示すように水位の計算結果は実測値に全体的によく適合している。また

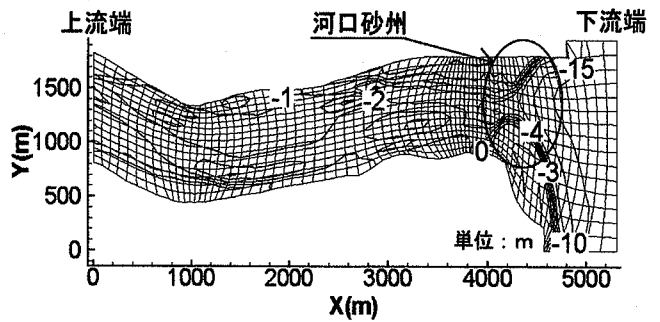


図-2 曲線座標系上の計算領域と河床標高

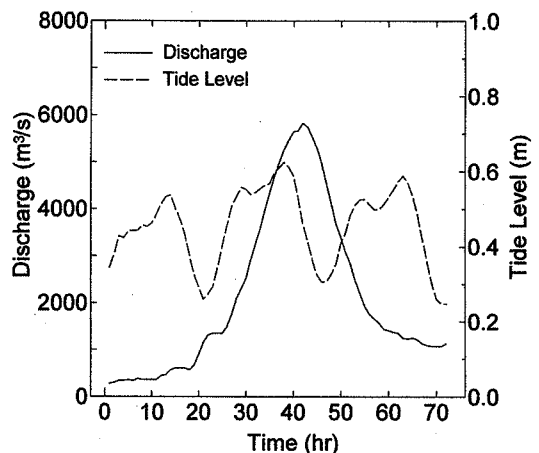


図-3 境界条件

上流端条件(discharge)

下流端条件 (Tidal Level)

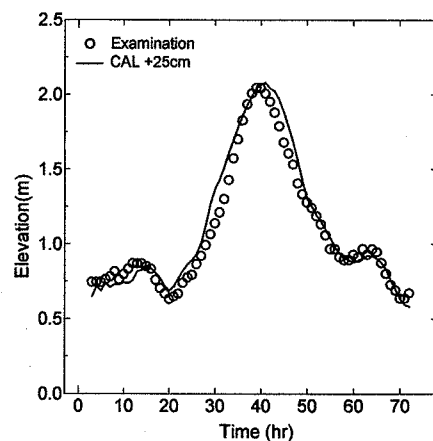


図-4 松ヶ崎の水位による計算値と観測値の比較
(新潟西港水位+25cm)

ピーク時の水位もよく一致していることがわかる。図-5には、横軸に水位の観測値、縦軸に計算値を取り、計算と実測の比較を示す。プロットは概ね原点を通る45°の線上に分布しており、計算の妥当性が確認できる。この

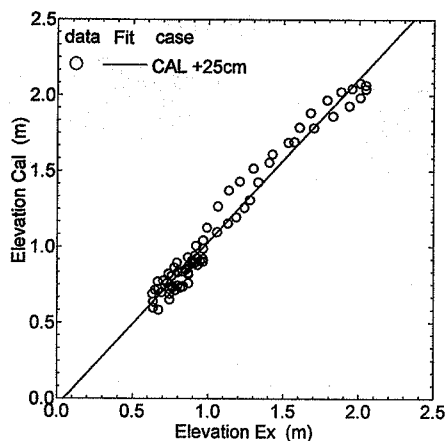


図-5 観測値と計算値の相関

結果より、新潟西港の潮位データに25cmを加えた水位を計算の下流端条件と設定した。

(2) 流速ベクトル分布

図-6にはピーク流量時の流速分布を示す。図-6の上側はフラッシュが生じないとした場合すなわち固定床、下側はフラッシュがある場合すなわち移動床での計算である。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河積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、しない場合に比べ十分な河積が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低減されている。

(3) フラッシュによる河口地形の変化

図-7にはフラッシュ現象による河床地形変動の分布に関する時間的変化を示す。各図の右上側が上流端、左下側が河口である。時間が経過するにつれて、河口部で砂州がフラッシュされて行く様子がわかる。砂州は中央部でまず崩壊しはじめ、削れた土砂は、砂州から河口側に移動して一旦、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、砂州の崩壊へと至る。また河口よりやや下流部は河口幅も広がり、河積が増大して流速が低下する。崩壊した砂州から移動してきた土砂が移動できなくなり堆積していく傾向があらわれている。このようにして堆積した土砂がいわゆる河口テラスを形成していく。

(4) フラッシュによる水位上昇の緩和

図-8は阿賀野川の中央部の河床高および水位の縦断方向の分布についてフラッシュの有無を比較して示してい

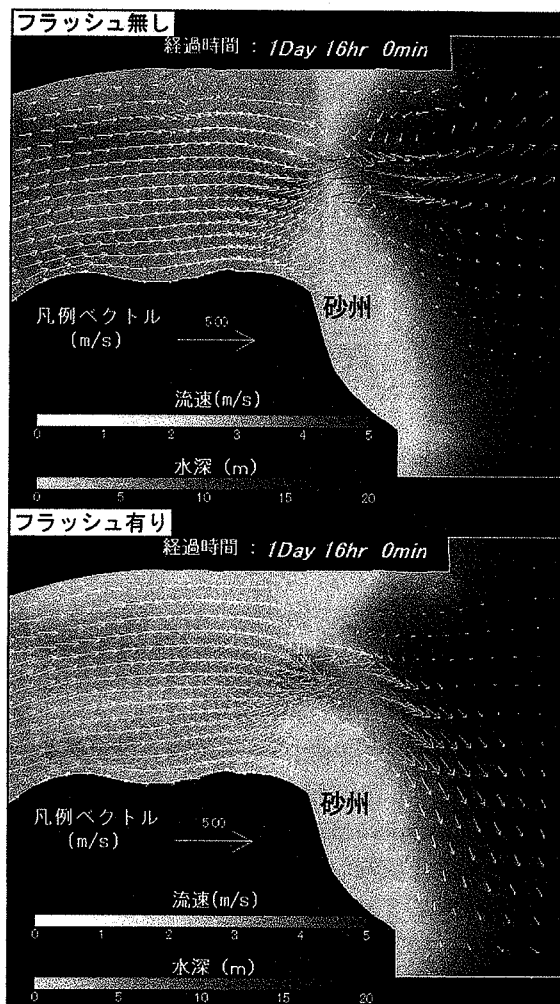


図-6 フラッシュの有無による流速の比較
水位最大時
上段：フラッシュあり，下段：フラッシュなし

る。各図の右方向が下流側である。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おり、各図中には堤防標高(点線)もあわせて示している。また上の図から下の方向に時間の経過を表している。経過時間がちょうど1日程度のときはまだ地形の変化がおこっていないため、フラッシュの有無に応じた水位の違いは顕著には見られない。しかし時間の経過とともに、徐々に河口地形標高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。地形は砂州部の底面で大きく削られる。そして砂州よりやや下流側に堆積している。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。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

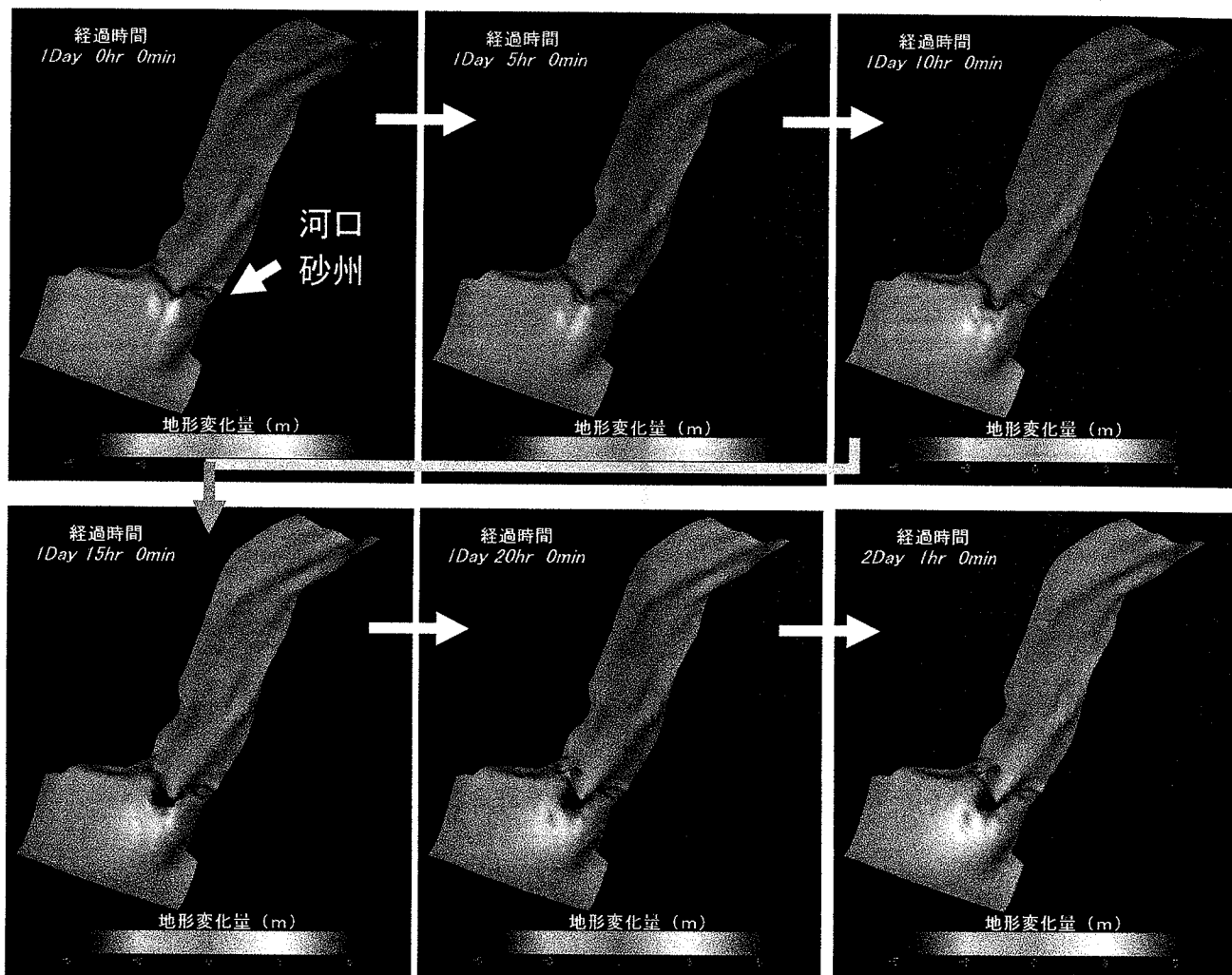


図-7 フラッシュによる河口地形の時間変化

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河口の最も天端標高の低い堤防天端とほぼ同じ高さまで水位が上昇していることが分かる。河口砂州のフラッシュの有無による水位差が最も顕著なのは、水位が最高になった時点（図-8右中段）であり、2m程度となっている。また、その差は河口付近で最大となっており、上流に向かうに連れてその差は低減している。本研究の範囲では、河口が最も危険となる結果となったが、堤防の標高が一部低くなっている部分があり、上流方向で部分的な危険がないと断言することは難しい。

4. まとめと考察

本研究では、平面2次元の数値モデルによって洪水

時の河口砂州のフラッシュによる地形変化およびそれに伴う水位上昇量の低減効果について定量的に把握することができていることが分かった。今回対象とした平成14年の洪水の場合、フラッシュが生じた場合、それが生じない場合に比べて最高水位の差が2m程度となった。一方、フラッシュが全く生じない場合には阿賀野川下流端の堤防の天端高さとほぼ同じ高さまで水位が上昇することが分かった。阿賀野川の河口は左岸側が空港滑走路端部、右岸側が住宅街となっている。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。

本研究で用いた流れの数値計算法では、河口砂州のフラッシュ現象を浮遊砂・掃流砂として表現した。この計算法では砂州の形状変化は没水部のみであり、側岸侵食による水面上の砂州の崩落が含まれていない。また、砂州に作用する動圧としての外力が含まれていないなどの問題があると考えている。特に後者は例えばホースの先端に取り付けたノズルを吹き飛ばすような圧力として

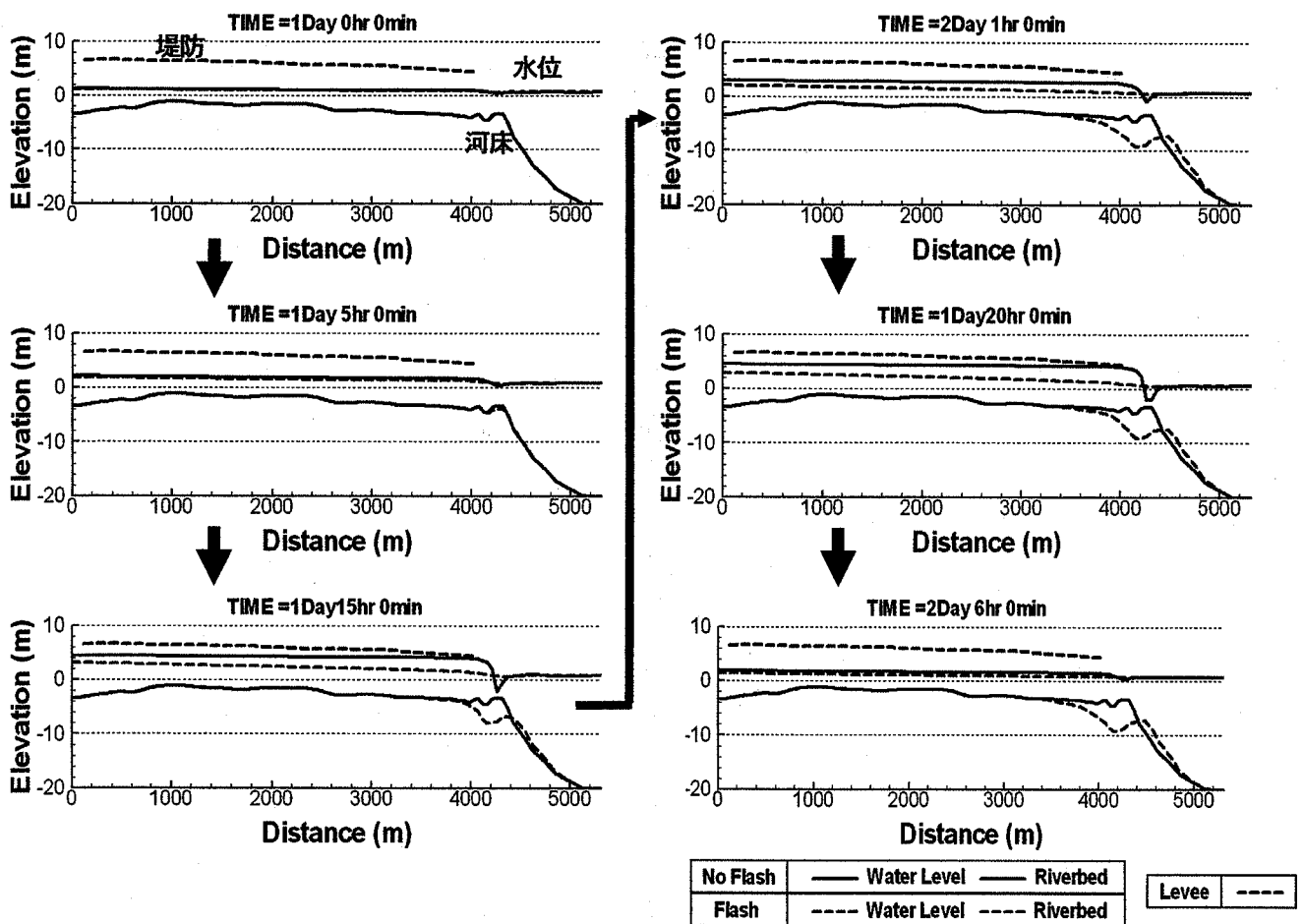


図-8 フラッシュの有無による河床変動と水位の縦断分布の違い
矢印の方向は時間発展を示す。

の外力であり、今後そのような効果の有無について検討してみたいと考えている。また、河口砂州の崩壊による塩水くさびの遡上の増加については現地観測によりその傾向が報告されており、数値モデルによる検討を行う予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、河川懇談会（前：座長福岡捷二中央大学教授，座長：辻本哲郎名古屋大学教授）および同懇談会の委員の先生に多くの有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 細山田得三，張瑞瑾，星野雄亮：河口砂州の生成に及ぼす河川水と海岸波動の影響に関する基礎的数値実験，海岸工学論文集，第52巻，pp. 561-565，2005。
- 2) 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，長岡技術科学大学修士論文，pp. 62，2005。
- 3) 科学研究費補助金基盤研究(B) (1) 研究成果報告書(2005)：全

日本広域土砂収支評価，研究代表者田中仁，p. p171

- 4) 佐藤智昭・Totok Suprijo，真野明(2004)：河口砂州を有する主な河川の最狭開口部平衡条件，海岸工学論文集，第51巻，pp. 526-530。
- 5) 科学研究費補助金基盤研究(C) (2) 研究成果報告書 (2005)：河口および潟湖入り口における地形平衡条件に関する研究，研究代表者真野明，pp. 18。
- 6) 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義資料，土木学会水理委員会基礎水理部会，pp61-76，1999。
- 7) 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/II-34，pp53-56，1993。
- 8) 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。
- 9) 関根正人：移動床流れの水理学，共立出版，pp. 211，2005。

(2006. 4. 6 受付)