

洪水時における河口地形変化の数値計算

——格子間隔、掃流砂、浮遊砂、二次流の効果について——

桑原直樹*・田中 仁**・佐藤勝弘***・首藤伸夫****

1. はじめに

越流による河口砂州の崩壊に関しては現在までに、土屋・山口 (1967), 小川・首藤 (1985), 福岡ら (1983), 邵ら (1993) により実験的・理論的研究がなされてきた。ただし、これらはいずれも実験室規模の二次元砂州を対象としており、現実の三次元的な現象について検討を行った研究例は少ない。実際の三次元現象においては、河口部主流路の流れとの兼ね合いからフラッシュ発生タイミング・越流流量が決まり、これが砂州侵食量、堰上げ水位などに影響を与える。この様に、三次元砂州の崩壊過程は二次元のそれに比べはるかに複雑なものとなっている。

河口砂州は塩水や波浪の遡上を阻止することから、導流堤などの構造物の建設に代わって河口砂州の存在を前提とした河道計画の試みも報告されている (宇多ら, 1994)。このような動きに連動して、近年計画洪水あるいはそれに近い洪水時の砂州フラッシュの数値計算がいくつか行われるようになった。宇多らは人工リーフを用いて砂州高さを低下させる手法を提案し、有限要素法により河口地形変化のシミュレーションを行っている。また、佐藤・首藤 (1992), Tanaka et al. (1995) はいずれも仙台市・七北田川を対象に平面二次元計算を行い、実測値との比較を行っている。

著者らは宮城県・名取川を対象として出水時河口地形変化の数値計算を行い、計算値と実測値の比較を行った (桑原・田中, 1994, 以下前報と呼ぶ。)。しかし、両者の対応は必ずしも充分ではなく、その原因として、格子間隔、浮遊砂、二次流などの影響が考えられた。そこで、本研究ではこれらの項目が数値計算結果に及ぼす効果について定量的検討を行った。

2. 名取川河口の概況

本研究の対象となる名取川は図-1に示す様に宮城県のはほぼ中央部に位置し、水源を宮城・山形県境に発し、

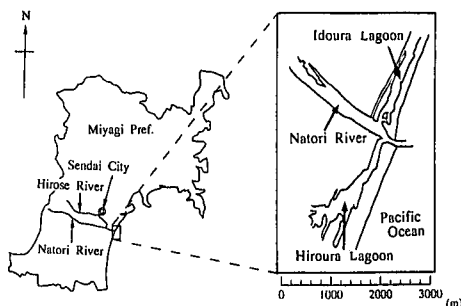


図-1 名取川的位置

広瀬川等の中小河川と合流して、名取市閘上で太平洋上に注ぐ一級河川である。流域面積は 938.9 km², 幹線流路延長は 55.0 km である。

名取川河口の砂州は長期的にみれば安定した砂州であり、近年河口砂州を有する他の河川で多くで見られるような、河口砂州の河川側の退行や縮小が起こる可能性は少ない。そこで、河川管理上は洪水時に砂州がフラッシュされるか否かが問題であったが、1986年8月に大規模な砂州フラッシュが見られた。その他、1982年9月、1989年8月、1993年8月、1994年9月にもフラッシュが観測されている。

3. 河口地形変化の数値計算法

3.1 基礎式

基本的な計算法は前報と同様であるので、相違点についてのみ説明する。

流れの基礎式は浅水方程式であり、これをリーフログ差分法によって解いた。流れの計算を行った後流砂量を求め、その結果から地盤高の時間変化を求めた。流砂量公式としては、掃流砂量式として前報と同様に Meyer-Peter and Muller (1948) (以下 MPM と略す) の式を用い、さらに本研究では Brown (1950) によって示された Einstein-Brown (同 E-B) の式を用いた計算も行った (表-1 参照)。実際には、次式のように提案されている式形に係数 α をかけ、この値を調整した。

$$MPM: q_0 = 8\alpha \sqrt{sgd} (\tau^* - \tau_{cr}^*)^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

* 学生会員 東北大学大学院 工学研究科
 ** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所
 **** 正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター

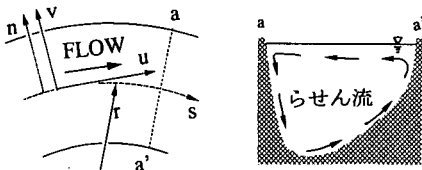


図-2 らせん流の説明

$$E-B: q_b = 40F(d)\alpha\sqrt{sgd}(\tau^* - \tau_{cr}^*)^3 \dots \dots (2)$$

ここで、 q_b : 掃流砂量、 s : 砂粒子の水中比重、 d : 砂の粒径、 τ^* : 無次元掃流力、 τ_{cr}^* : 移動限界無次元掃流力、 $F(d)$: Rubey (1933) による沈降速度に関連する関数である。また、浮遊砂量式を考慮した計算も行っており、その際には Lane and Kalinske (1941) (同 L-K) の式を用いた。

さて、名取川河口の導流堤は北に向かって湾曲している。水路が湾曲している部分での流れにはらせん流が発生する。このらせん流によって、底面付近の河床砂は外岸側から内岸側へと運ばれる。らせん流の大きさは主流に比べてそれほど大きくはないものの、河床の洗掘や堆積には大きな影響を及ぼすことがある。前報ではらせん流を加味していないことが良好な計算値を得られない理由のひとつであると推察された。そこで、清水ら (1987) と同様に Engelund (1974) の手法を用いることでらせん流についての考慮も行った。

Engelund によれば、図-2 の様に座標系を設定し、断面平均流速ベクトル (u, v) が既知の時、河床近傍の流速 (u_b, v_b) は次式で与えられる。

$$u_b = \gamma u, \quad v_b = \gamma v \dots \dots (3)$$

ここで、 $\gamma = 3(1 - \beta)/(3 - \beta)$, $\beta = 3/(\phi_0 \kappa + 1)$, ϕ_0 : 流速係数 ($= \sqrt{u^2 + v^2}/u^*$)、 u^* : 摩擦速度、 κ : カルマン定数 ($= 0.4$) である。さらに、流路が湾曲していることを考慮して、らせん流による横断方向の底面流速 v_b を求める。

$$v_b = -N^* \frac{h}{r} u_b \dots \dots (4)$$

ただし、 $N^* = 11.5$ (Rozovskii, 1961)、 h : 水深、 r : 曲率半径である。式 (4) を用いて、 n 軸方向の流砂量 q_{bn} は次式で求められる。

$$q_{bn} = q_{bs} \frac{v_b + v'_b}{u_b} \dots \dots (5)$$

ただし、 q_{bs} : s 軸方向の流砂量である。

なお、清水ら (1987) は、式 (5) に底面勾配を効果を加えた長谷川 (1984) の式を用いているが、今回の計算では渡辺ら (1984) の手法を用いて地形勾配が砂移動に与える効果を考慮した。これにより、河口前面テラス

表-1 計算条件

	掃流砂量式	浮遊砂量式	らせん流	Δx (m)	ϵ
Case 1	MPM	×	×	30	10
Case 2	MPM×3	×	×	30	10
Case 3	MPM×3	×	×	15	10
Case 4	E-B	×	×	15	10
Case 5	E-B×0.8	L-K	×	15	10
Case 6	E-B×0.8	L-K	○	15	30 ^{*)}

^{*)} ただし、らせん流のおよぶ領域で $\epsilon = 5$

の縁部での堆積形状を安定に計算することが出来た。ただし、フラッシュにより砂州上に生じた水路の側岸侵食についてはこの方法では考慮できない。これは、砂の移動方向と地形の傾斜角が直交することによる。そこで、ここでは砂面の傾斜が砂の水中安息角を越えないように調整を行った。ただし、前報と同様に波の影響は本計算中に考慮していない。

以上の諸式を基本として、本研究では表-1 に示したように 6 ケースの計算を行った。Case 1 は MPM 式を用い比較定期粗いメッシュで計算を行った。Case 2 は、格子のサイズはそのままに MPM 式の係数を 3 倍に増加させたものである。Case 3 は格子サイズを 15 m とし、他の条件は Case 2 と同じである。これにより格子サイズの効果を検討した。Case 4 は MPM 式に代わって E-B 式を用いており、掃流砂量の違いによる計算結果の相違を検討した。Case 5 は掃流砂に加えて浮遊砂を加えたものであり、Case 6 はさらに二次流の効果を考慮したものである。ただし、Case 1、Case 2 は前報のものである。

3.2 計算対象洪水

本研究では、前報と同様に 1986 年 8 月の台風 10 号による出水を対象とした計算を行った。この時のピーク流量は 2,356 m³/sec であり、左岸河口砂州が幅約 100 m にわたってフラッシュされた。

計算は 1986 年 8 月 4 日午前 11 時から 6 日 24 時の 49 時間とし、計算領域を図-3 に示す。図中には移動床計算開始時における等水深線も示されている。また、鎖線は横断測定の測線、★印は水位観測を行っている関上第二観測所の位置を表している。これらの測線、測点での観測結果を後に数値計算の検証データとして用いる。

4. 計算結果

4.1 各 Case の比較

ここでは、各 Case の計算結果の比較を行う。図-4 は水位を比較したもの、図-5(a)、(b) は横断面を比較したものである。各 Case の比較により得られる結果を列記すれば、以下の様である。

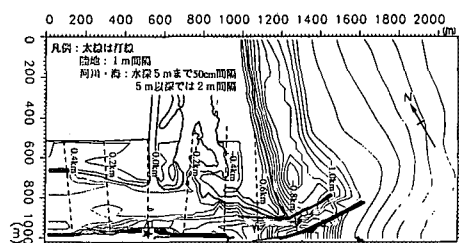


図-3 計算領域

a) Case 2 と Case 3 との比較により、河口部での平面二次元計算から得られる結果は、格子サイズに大きく依存すると言える。一般に河口部では砂州、導流堤等の構造物の存在により、その地形が複雑である。粗いメッシュではこのような地形を表現することが出来ず、過度な凹凸をもつ地形として計算されてしまうことに注意しなければならない。Case 1, Case 2 では後藤・首藤(1981)が報告した結果と同様に、階差状の境界から発生する反射のためにところどころに離散的な水位の高まりが観察された。

b) それぞれの流砂量式は、本来それぞれの適用範囲を有しているため、その使用に際しては注意しなければならない。今回の計算条件下では、MPM式による移動砂量が過小評価傾向を示し、地形を再現できなかった。

また、洪水ピーク近くでは浮遊砂量が発生する状態に至り、これを考慮することにより、良好な結果が得られている。

c) 導流堤は曲率を有するため、洪水時には湾曲部外側に深掘れが生じる。このような現象は本来3次元式的であるが、清水ら(1987)は平面二次元計算にらせん流の効果を組み込む手法を提案している。今回の計算では、同手法を用いることにより最終的な深掘れ地形を再現することが出来た。

以上、当然のことながらより多くのファクターについて考慮することにより、それに伴って結果は改善されてきた。当然、本来の流れの3次元性を考慮すれば、3次元計算によるアプローチも考えられるが、計算時間が多

大となるため実用的ではない。一方、Case 6 の計算では、Case 4 に比べ、浮遊砂及びらせん流の効果が含まれてはいるが、その計算時間は Case 4 と比較して 25 % 程度の増加が見られたに過ぎない。

4.2 Case 6 の計算結果

先の結果により、Case 6 の計算によってかなり実測値に近い結果を得ることが出来た。そこで、以下に Case 6 の計算結果を示す。

a) 水位変化の比較

前出の図-4 には各 Case での実測水位と計算水位を比較したものが示されている。実測水位と計算水位を比較するとピーク水位は、実測水位と Case 6 の計算水位は、かなり良い一致を示し、またピーク流量付近での水位変動も良い一致を示していることがわかる。しかし、計算初期の水位変化とピーク流量以後の水位変化については、若干差異が見られる。

b) 流速ベクトルと左岸砂州フラッシュ

次に、図-6(a) にピーク流量時の流速ベクトルを示

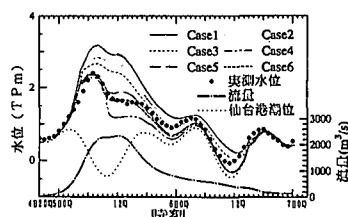


図-4 各 Case の水位変動の比較

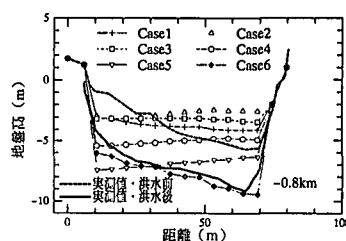


図-5(a) 各 Case の横断面の比較 (-0.8 km 断面)

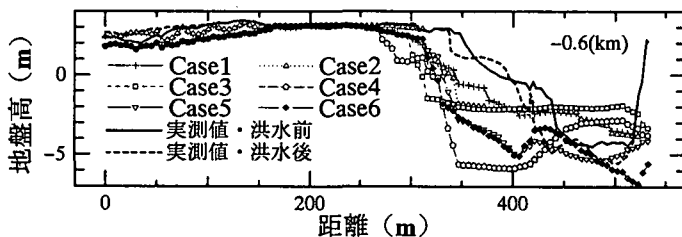


図-5(b) 各 Case の横断面の比較 (-0.6 km 断面)

す。図-6(b) はピーク流量時の河口部のコンターである。左岸砂州の前面に河口テラス地形が形成されていることがわかる。砂州フラッシュの幅は約 40 m 程度であり、航空写真(写真-1)と比較すると計算による砂州フラッシュの幅は実際より小さめである。

c) 横断面の変化

図-7(a), (b) には、計算開始時、計算開始から 6 時間、ピーク流量時、及び計算終了時における河口横断面の変化を示す。図に書かれている km 数は、図-3 に見られる位置の測線を示している。全体の傾向としては、計算開始 6 時間からピーク流量時までの間に大きく地形が変化しているといえる。以下に各断面についての特徴を示す。

(i) -0.8 km 断面

計算値では計算開始から 6 時間までに地形が横断方向に平均化されてる。そして、ピーク流量時までに全体的な浸食と右岸側の深掘れが進み、最終的には実測値にかなり近い結果が得られた。

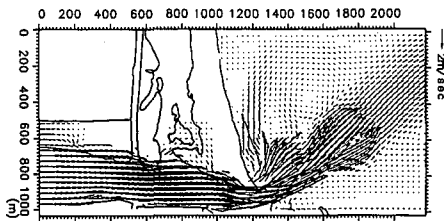


図-6(a) ピーク流量時の流速ベクトル

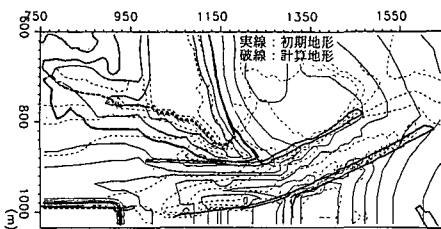


図-6(b) ピーク流量時の河口部地形



写真-1 航空写真(出水後, 61年8月13日撮影)

(ii) -0.6 km 断面

計算開始から 6 時間まではそれほど変化はみられない。しかし、それからピーク流量時までに左岸砂州がフラッシュされていることがわかる。計算値では、左岸の砂州は、出水後の実測値に比べてかなり深く掘れている。これは、出水後の実測が出水終了後およそ 2 週間経過してから実施されたため、そのあいだに左岸砂州が回復したことがひとつの理由であると思われる。

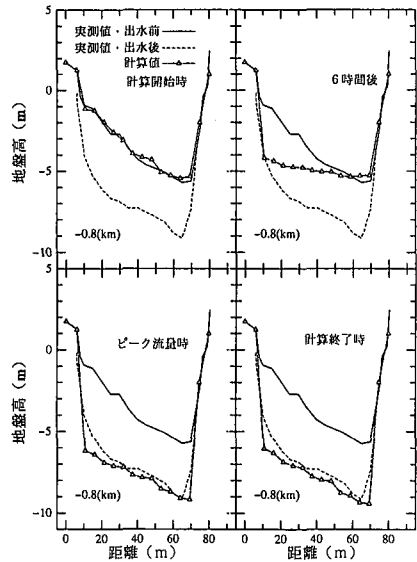


図-7(a) 横断面の変化 (-0.8 km 断面)

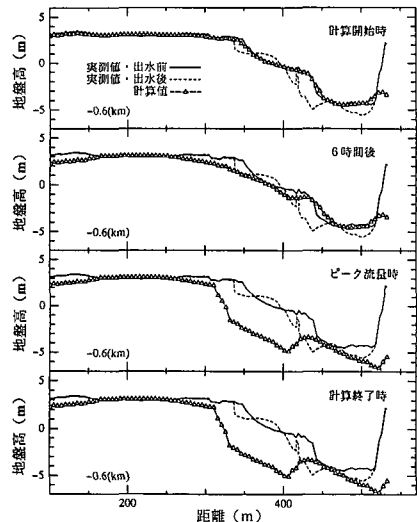


図-7(b) 横断面の変化 (-0.6 km 断面)

5. ま と め

本研究では、数値計算によって出水における名取川河口地形変化の再現を試みた。前報の計算に比べて、格子サイズを細かくすること、適切な掃流砂公式の選択、さらには浮遊砂や二次流による砂移動の考慮により、河口内水位や河口地形変化について実測値にきわめて近い計算結果を得ることが出来た。ただし、水位波形を詳細に見ると計算値と実測値に差異が見られる。この原因としては、入射波浪の効果、河口近くで合流する堀・小河川からの流入量の影響、井戸浦・広浦での貯留効果などが考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、文部省科学研究費（総合研究（A）、代表：東北大学澤本正樹教授、試験研究（B）、代表：田中仁）の補助を受けた。また、建設省東北地方建設局仙台工事事務所からは貴重な現地観測データを提供して頂いた。さらに、本論文の公表に対して小川基金の補助を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 宇多高明・高橋 晃・水魔嘉幸・高木利光 (1994): 人工リーフを用いた河口処理工の検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 506-510.
- 小川由信・首藤伸夫 (1985): 河口砂州の崩壊に関する実験的研究, 東北地域災害科学研究, 第21巻, pp. 22-25.
- 桑原直樹・田中 仁 (1994): 名取川河口地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 501-505.
- 後藤智明・首藤伸夫 (1981): 河川津波の遡上計算, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 64-68.
- 佐藤勝弘・首藤伸夫 (1992): 洪水による砂州崩壊過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 396-400.
- 清水康行・板倉忠興・山口 甲 (1987): 2次元モデルを用いた河床形態変化のシミュレーション, 第31回水理講演会論文集, pp. 689-694.
- 邵 小敏・田中 仁・首藤伸夫 (1993): 越流による砂州崩壊に関する研究, 土木学会論文集, No.479/II-25, pp. 31-40.
- 土屋昭彦・山口高志 (1967): 河口砂州の崩壊に関する研究, 第11回水理講演会論文集, pp. 37-42.
- 長谷川和義 (1984): 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文.
- 福岡捷二・山坂昌成・安陪和雄 (1983): 強い非平衡流砂運動を伴う河床変動, 第28回水理講演会論文集, pp. 679-684.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Brown, C. B. (1950): Engineering Hydraulics, ed. Rouse, H., John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y. pp. 797.
- Engelund, F. (1974): Flow and bed topography in channel bends, Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol. 100, No. HY. 11, pp. 1631-1648.
- Lane, E. W. and Kalinske, A. A. (1941): Engineering calculations of suspended sediments, Trans. AGU, Vol. 22, pp. 603-607.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948): Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, pp. 39-64.
- Rozovskii, I. L. (1957): Flow of water in bends of open channels, Academy of Science of the Ukrainian S. S. R., Israel Program for Scientific Translations, pp. 1-131.
- Rubey, W. W. (1933): Settling velocities of gravel, sand and silt particles, Amer. Jour. Sci., Vol. 25, pp. 325-338.
- Tanaka, H., Okabe, K. and Shuto, N. (1995): Numerical simulation of velocity field and sand movement at a river mouth during a flood, Proc. the 2nd Int. Conf. Multiphase Flow, pp. P9-13~P9-20.