

中小河川特有の河口現象を考慮した地形変化予測モデル

山内 健二*・田中 仁**

1. はじめに

適度に発達した河口砂州は塩水や波浪の進入を防ぐ効果を持つが、極端に成長した河口砂州は河口部での通航能力の低下をもたらすため治水上の問題が生じる。近年、人工構造物に依らない河口維持計画が注目されるに従い、このような河口地形の変動によってもたらされる河口部での水理量の増減を定量的に評価することが必要とされている。このため、数値モデルを用いた予測計算などが有効な手段となる。本研究では宮城県の二級河川・七北田川に対してのモデル適用を試みている。田中 (1995) の研究によれば、七北田川のような典型的な中小河川においては大河川とは異なる特有の河口現象が見られることが知られており、従来の大河川を対象とした数値モデル (例えば、桑原ら, 1996) をそのまま用いることは出来ない。

このような点を踏まえ、中小河川特有の河口現象を考慮したモデルを構築し、既往洪水の再現計算がなされている例がいくつかある (佐藤・首藤, 1992; 山内・田中, 1997)。しかしながら、前報 (山内・田中, 1977) では河口部のみという限定された計算領域のため、河川内への逆流等、実際の河口部での水理現象を再現できない場合があった。今回、このような問題点を改善すべく計算領域を感潮区間全域まで、すなわち上流側へ拡張し、河川自己流量に比べて潮汐の作用が卓越する時期についても再現可能な数値モデルを得た。さらにこの改善された数値モデルを用いて、各種条件下における洪水時の予測計算を行い、河口地形と河口水理との関係について定量的検討を行った。

2. 七北田川の概況

本研究の対象となる七北田川は宮城県・仙台市北部を流れる二級河川で、幹川流路延長は 45 km、流域面積は 229.1 km^2 、また、計画高水流量は 1,650 m^3/s に設定されている。図-1 に七北田川流域の概要図を示す。河口左岸側には蒲生干潟が、また、河口から北方へ約 2 km のとこ

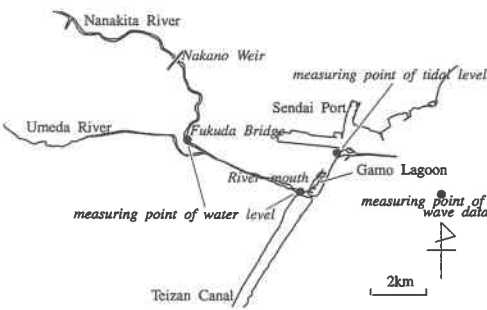


図-1 七北田川流域概要図



図-2 七北田川河口航空写真

ろに仙台港が位置している。さらに河口から約 4 km 上流の地点で支流の梅田川が本川に流入している。また、同図には水位観測地点 (福田大橋、河口内)、潮位、波浪の観測地点なども示されている。

地形変化が最も顕著にみられる河口砂州部分 (図-2 白枠内) では地形測量が実施されており、特に洪水時における砂州崩壊およびその後の砂州回復過程の観測を行っている。96 年度は出水による河口砂州のフラッシュを 2 度観測することができた。図-3 に 96 年 9 月にみられた砂州崩壊前後の実測図を示す。このイベントは 9 月 22 日台風 17 号によりもたらされた出水 (ピーク流量 200 m^3/s) により発生した砂州崩壊である。

3. 計算方法

図-4 に示すような要領で上流端に流量、下流端に水位を与えて不定流計算を行う。七北田川においては wave set-up による河口内での水位の上昇を考慮する必

* 正会員 工修 株式会社大林組

** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

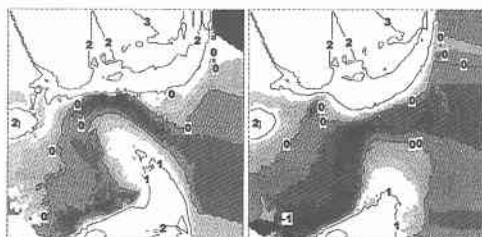


図-3 洪水前後の砂地形 (96年9月)

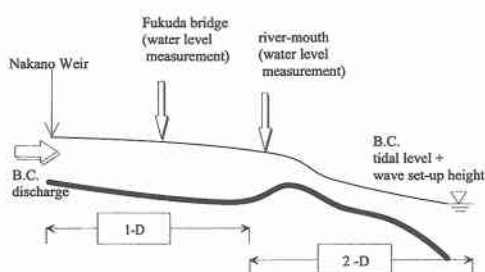


図-4 数値計算概要図

要がある(田中・長林・山内, 1998)。ここでは前報(山内・田中, 1997)と同様に, wave set-up 高さを沖波波高の関数として表現し, これに潮位を加算した水位を下流端境界条件として与えることにした。

計算範囲は河口域を含めた $450\text{ m} \times 1200\text{ m}$ の二次元計算領域(図-2)と, この二次元領域の上流端から中野堰まで約 10 km の一次元領域とから構成されており, 両者を接続しての同時計算を行っている。なお一次元領域は支流の梅田川も含んでいる。

計算方法・境界条件等は, 今回新たに拡張された一次元領域を除いては前報(山内・田中, 1997)と同様であるので詳細は省略し, 以下に簡潔に述べる。

(1) 一次元領域

洪水期間を再現するには洪水の立ち上がる数十時間前から計算を始め, 流れの初期条件(流速=0, 水位=一様勾配)の影響が再現期間に及ばないようにしなければならない。そこで, 河川の逆流時などの計算が可能となるよう感潮区間全域に計算領域を設定し, 上流側は一次元で計算した。

基礎式として, 一般に用いられている一次元不定流の運動方程式, 連続式を用いた。これらを差分化して流量 Q , 通水断面積 A について解いた。摩擦勾配については Manning 則を用いている。

(2) 二次元領域

水平拡散項を考慮しない平面二次元の浅水流方程式を leap-frog 差分法(後藤ら, 1982)で解いた。底面摩擦力は一次元領域と同様に Manning 則を用いて表現した。

(3) 蒲生干潟との水の交換

蒲生干潟との水の交換は通水管および締め切り堤上の越流により行われる。通水管では Manning 則により通水流量を計算し, また越流量は以下に示すもぐり越流の式を用いた。

$$Q_{\text{overflow}} = 2.6 C_0 B h_2 \sqrt{h_1 - h_2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで Q_{overflow} : 越流量, h_1, h_2 : それぞれ越流上流側・下流側の水深(せき頂を基準とする), $C_0 (=1.24 + 1.64 h_1/W)$: 完全越流係数, B : 越流幅, W : せき高である。

以上のような手法を用いて干潟内へ流入あるいは干潟から流出する流量をそれぞれ求めている。

(4) 流砂の計算

前報(山内・田中, 1997)同様, 掃流砂のみを対象とした Meyer-Peter and Müller の式を用いた。

4. 再現計算および各種境界条件の影響

(1) 既往洪水の再現計算

再現計算によりまずモデルの検証を行う。case 1 でまず河川流量の小さい時期を対象に計算を行った。case 2 は 1996 年 6 月の洪水, case 3 が 1996 年 9 月 22 日台風 17 号によりもたらされた洪水である。河口内での計算水位と実測水位の比較を図-5, 図-6, 図-7 にて行う。このときの河川流量, 波高, 潮位も同図に示した。

case 1 の計算に用いた初期地形はこの計算期間内 9 月 18 日の実測時のものであり, このことが良好な再現結果につながったと考えられる。一方, 洪水時の計算 case-2, case-3 については, 計算に用いた初期値形はそれぞれの洪水計算開始時のものではなく case 2 については洪水 19 日前, case 3 については洪水 4 日前の実測により得た地形であるため, case 1 ほどの良好な一致は得られないが, 概ね河口内水位を再現できている。

case-3 の前半(20 日から 21 日にかけて)河口水位が上

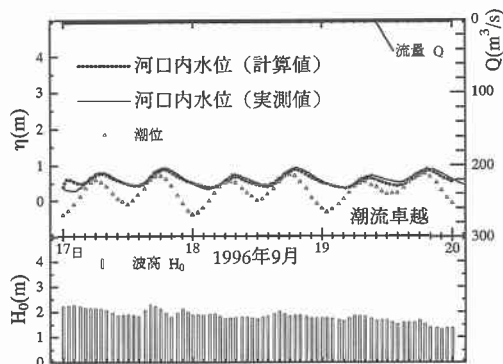


図-5 計算水位と実測水位の比較 (case 1)

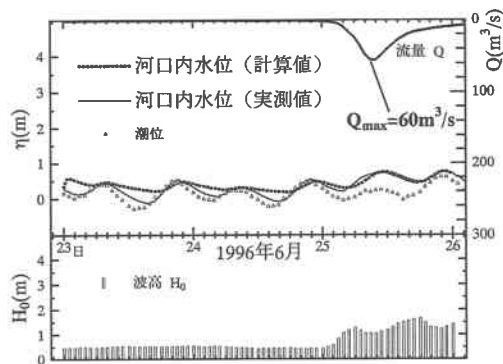


図-6 計算水位と実測水位の比較 (case 2)

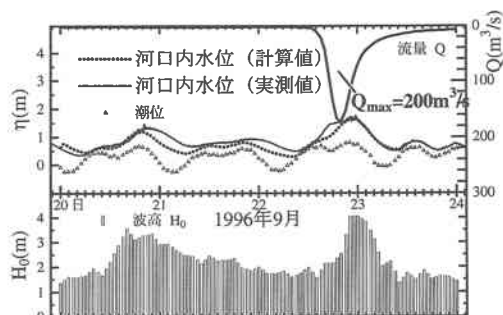


図-7 計算水位と実測水位の比較 (case 3)

昇しているのは波浪によるもの、すなわち wave set-up によるものである。一方、後半(22日から23日)については一見洪水による水位せき上げに見えるが、この期間4m近くもの高波浪が来襲している。したがって、この場合における河口水位の上昇も主に波浪に起因する wave set-up によってもたらされていることが判った。このことは河口水位と波浪のピーク時期が一致していることから推測できる。

case 3 について計算された砂州地形を図-8に示す。図-3に示された河口部の実測地形と比較すると、砂州形状の変化が計算結果と類似しているが、細かな地形変化に差がみられるところもある。これは①河口部の最狭部での開口幅がただか100m程度であるのに対して、計算では10mという空間格子を用いていること、②波浪による漂砂を計算では考慮していない(実際case 3では4mもの高波浪が来襲している)という二点に起因していると考えられる。より細かな格子サイズで計算を行い、さらに漂砂機構も計算に取り入れれば地形の計算精度は向上すると考えられるが、現状の計算方法のままで水位に関しては良い再現精度を与える数値モデルであることが確認された。

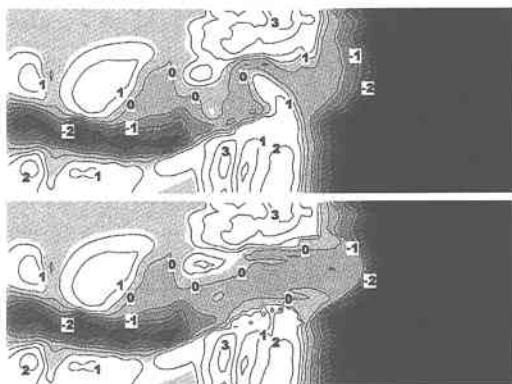


図-8 河口地形(case 3, 上:洪水前 初期地形, 下:洪水後 計算地形)

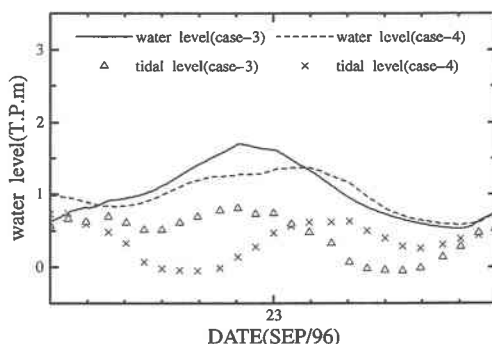


図-9 潮位変動の違いによる河口水位の変化 (case 3 と case 4 の比較)

(2) 各種境界条件が河口水位に及ぼす影響

a) 潮位(下流端境界条件)の影響

case 3 は比較的小規模な洪水であるが、このような場合、下流端の水位の影響が非常に強いことが判る。そこで潮位変動がどの程度影響しているのかを把握するために潮位変動だけを11時間シフトさせて、流量のピークに潮位が最も低くなるような下流端の境界条件で再び計算を行った(case 4)。

図-9はこのcase 4の計算水位、潮位変動を示したものである。比較のためcase 3の結果も同図に示した。流量ピーク時(22日20時付近)には50cmほどの河口水位の差が生じている。本論文には図示していないが、計算地形に関して、流量ピーク時に潮位の高かったcase 3では砂州の崩壊がなかなか進行しなかったのに対して、case 4では潮位が低いために流れが左岸のみお筋に集中して深掘れが生じるという異なる結果を得た。このことから、場合によってはハイドログラフに対する潮位のタイミングが洪水規模と同等あるいはそれ以上の砂州侵食効果を有すると言える。

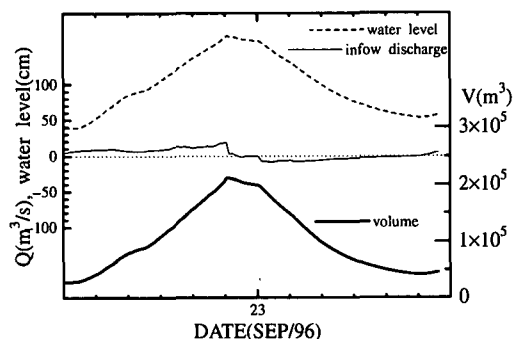


図-10 干潟内への流入量, 干潟水容積, 干潟水位 (case 5)

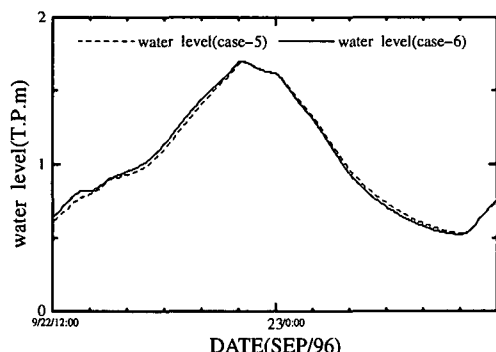
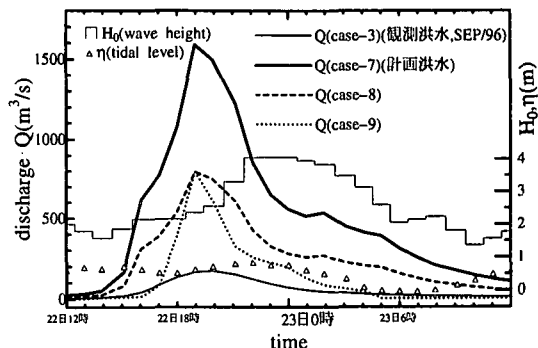
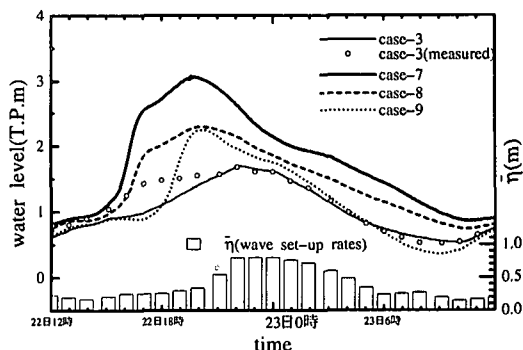


図-11 水位比較 (干潟有: case 5, 干潟無し: case 6)

b) 干潟水域の影響

著者ら (田中・山内, 1997) の調査によれば, 近年蒲生干潟内で顕著な土砂堆積が見られる。今後, 干潟環境の保全を考える際, これらの干潟水域が河口部での洪水時水理量に与える影響を定量的に理解しておくことは重要である。case 1~case 4 までは干潟内への流入に伴い, 干潟の水位が一樣に上下するものとして計算を進めてきたが, ここでは干潟内における流れの計算を二次元で行った場合 (case 5) と干潟への流入が全くない場合 (case 6) の計算を行い比較検討を行った。なお流量, 潮位, 波浪などの諸元は case 3 と同条件で計算を行った。

図-10 に case 5 での干潟内への流入量, 干潟水容積, 干潟水位を示す。この場合ピーク時流量約 200 m³/s のうちの一割程度が干潟内へ流入している。図-11 は case 5 と case 6 の計算水位を比べたものであるが, 今回のような小規模な洪水では下流端の水位の影響が強いため顕著な差はみられない。増水期には干潟が存在する場合 (case 5) のほうが僅かながら河口水位が押さえられ, 減水期にはその逆の傾向がみられる。

図-12 計算に用いた洪水波形
(case 3, case 7, case 8, case 9)図-13 洪水波形の違いによる河口水位の変化
(case 3, case 7, case 8, case 9)

5. 計画洪水時のシミュレーション

(1) 計算ケース

七北田川での計画洪水は 1,650 mm³/s に設定されている。これは昭和 23 年・アイオン台風時の降雨量観測値から流域流出量を算定した結果得られたものであり, この時七北田川上流部にある七北田ダムはまだ存在しなかった。七北田ダムの建設以降は, 幸いこのような大洪水には見舞われていない。ここ数年の洪水記録のなかで大きいものをピックアップしても 1989 年の 780 m³/s (河口部到達ピーク流量), 90 年の 470 m³/s, 94 年の 450 m³/s, といったような規模であり七北田川の平水流量 2~3 m³/s からするとかなり大きいものではあるが, 昭和 23 年のものとくらべるとその半分以下にとどまっている。

ここでは case 3 の再現計算時に用いた洪水ハイドログラフの他, 計画流量ハイドログラフ (ピーク流量 1,650 m³/s) を入力して計画洪水時の計算を行った (case 7)。さらにこの計画洪水の流量を半分に縮小したハイドログラフ (case 8) および case 8 の洪水立ち上がり速度を 2 倍にしたもの (case 9) での計算も追加した。

図-12 にそれぞれの計算で与える洪水波形を示す。計

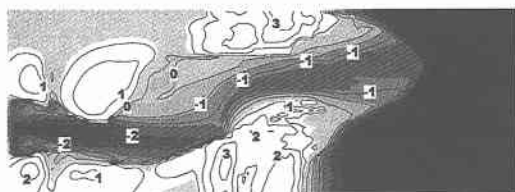


図-14 計画洪水時の地形変化 (case 7)

算で与える潮位変動および波浪条件も同図に示されており、洪水波形以外は96年9月の再現計算(case 3)のときと全じ条件で計算することにした。また、再現計算との比較が行えるように、9月22日の19時近辺で流量のピークを迎えるような横軸(時間軸)で表記してある。

(2) 計算結果

図-13がそれぞれのケースで計算された河口内水位である。case 7で入力した洪水波形は先の検証計算の規模をはるかに上回るものであるが、これによれば計画洪水時には河口内水位が約3mまで上昇することが分かった。case 3での水位ピークは図-12との対応をみると流量のピークよりも波高のピークと一致している。図-13には波浪データから見積もった wave set-up 高さもプロットしており、この wave set-up 高さが水位の上昇をもたらしていることが判る。これに対して、case 7～case 9の方は流量のピークと水位のピークが一致しており、それぞれの最高水位には洪水規模の違いがそのまま反映されている。

図-14はcase 7での洪水後の地形計算値である。case 3(図-8)と比べるとはるかに大規模な土砂移動が見られ、case 3ではみられない上流側の河道部分においても侵食域が現れている。このように本モデルを用いることにより、さまざまな洪水波形に対する河口水位・河口地形の応答を予測することが可能である。

6. ま と め

(1) 洪水規模の異なる3ケースの再現計算を行った

結果、本モデルは良い再現性をもつことが示された。

(2) 台風来襲時のような場合(case 3)には wave set-up により顕著な水位上昇が河口内にもたらされることが判った。また、小規模な洪水時には下流端の水位の影響が強いことが明らかになった。

(3) 各種条件下での計算結果から、潮位波形・干潟の存在・洪水波形などがもたらす河口水理への影響が明らかになった。

(4) 計画洪水時の流れ・地形変化を計算し、さらにハイドログラフの形状が水位、地形に与える影響について検討を行った。

謝辞: 本研究を行うにあたって、(株)テトラ応用水理研究所の佐藤勝弘氏より貴重な資料を頂いたことに感謝致します。また、現地資料を提供して頂いた運輸省塩釜港湾空港工事事務所、宮城県仙台市土木事務所、七北田ダム管理事務所に謝意を表します。なお、本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 桑原直樹・田中 仁 (1996): 洪水時の河口砂州崩壊現象に対する砂州高さ・潮位変動の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 631-635.
- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-Frog 法を用いた津波の数値計算, 東北大学工学部土木工学科, 52 p.
- 佐藤勝弘・首藤伸夫 (1992): 洪水による河口砂州崩壊過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 396-400.
- 田中 仁 (1995): 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, 第509号/II-30, pp. 169-181.
- 田中 仁・山内健二 (1997): バリアー・アイランド上の越波によるラグーン内での土砂堆積, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 646-650.
- 田中 仁・長林久夫・山内健二 (1998): 河口感潮域における wave set-up 高さに関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 436-440.
- 山内健二・田中 仁 (1997): 河口水位に及ぼす河口砂州の効果, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 441-445.