

鳴瀬川河口部における砂州地形変化機構

STUDY ON MECHANISM OF SAND BAR INTRUSION AT THE NARUSE RIVER MOUTH

川村 育男¹・田中 仁²

Ikuo KAWAMURA, Hitoshi TANAKA

¹正会員 工博 株式会社建設技術研究所 (〒980-0014 仙台市青葉区本町 2-15-1)

²フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

The Naruse River mouth showed stable topography at least until 1996. However, sand bar on the left-hand side of the river mouth has been declining in recent years. The behavior of the morphology of the river mouth after the flushing of the sand bar has never been observed. In this paper, characteristic morphological change at the Naruse River mouth is shown with the use of aerial photographs and morphological maps. In order to determine the main factor of morphological change, numerical simulation of extended Boussinesq equations are applied. It is concluded that, the mechanism of the sand bar intrusion into the river is explained by wave overtopping over the left-hand side sand bar at the river mouth. Furthermore, sand bar height and width are important factors of sand bar intrusion.

Key Words : Naruse River, sand bar decline, sand bar intrusion, Extended Boussinesq equations, wave overtopping

1. はじめに

河口部の地形は、波浪、潮汐流、河川流等の様々な外力を受けるため非常に複雑な変化を示す。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、極端な河口閉塞は洪水時に流下能力の低下をもたらす治水望ましいものではない。

本稿で対象とする一級河川・鳴瀬川河口には二本の導流堤があり、昭和30年頃から近年に至るまで、長期にわたり安定した河口砂州形状を維持してきた。しかし、近年河口部左岸側の砂州は後退して来ており、平成14年7月の出水によりフラッシュされた。その後この砂州は、元の安定した形状に回復することなく河道内に侵入するといった、これまで見られなかった挙動を示している。砂州が河道内に侵入することにより、河口港への航路障害等の問題が生じたばかりでなく、砂州による河積阻害が洪水時の河道水位上昇へ与える影響も懸念されている。導流堤のある河口において砂州が後退し、河道内に侵入する現象は他河川でも確認されており(川村ら¹⁾)、このような一連の砂州の挙動機構を明らかにすることは、適切な河口維持管理のために重要である。

本研究では、鳴瀬川河口部を対象にシミュレーションを行い、砂州の河道内侵入現象の要因について考察する

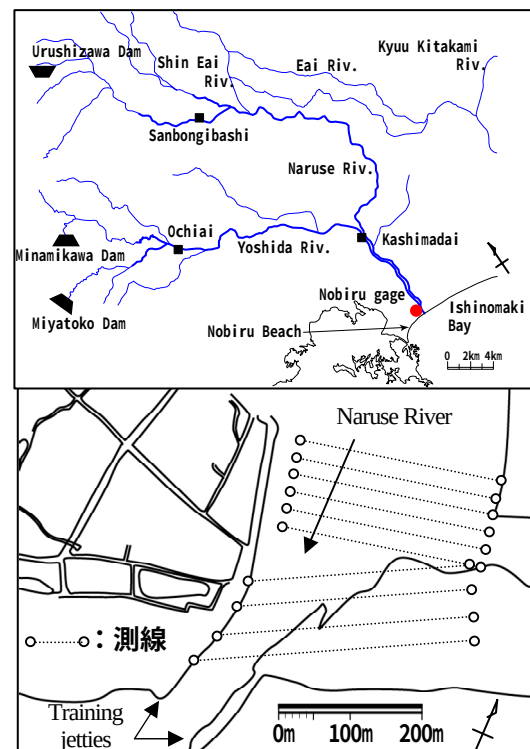


図-1 鳴瀬川河口の位置

とともに、砂州形状が砂州の河道内侵入現象に与える影響について検討した。

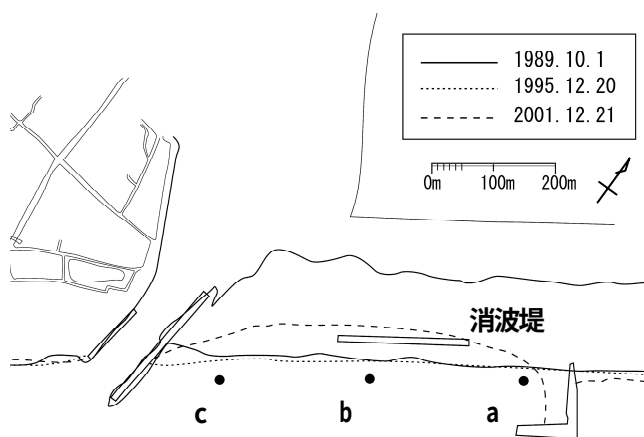


図-2 鳴瀬川河口部汀線

2. 鳴瀬川の概要

図-1に鳴瀬川河口の位置図を示す。鳴瀬川は宮城・山形県境の船形山を源とし、鹿島台町より吉田川と併流ののち、河口付近で合流し石巻湾に注ぐ幹川流路延長89km、流域面積1,133km²の一級河川である。河口から約0.5km上流に野蒜水位観測所があり、石巻湾東端に位置する牡鹿半島に鮎川検潮所がある。また、河口には、明治初期の大規模港湾計画「野蒜築港」以来の歴史的建造物である導流堤がある。

近年におけるイベントを河川流域と沿岸域に分けて整理すると、河川流域では鳴瀬中流堰が2002年に完成しており、桑折江堰の建設が1998年から行われている。また、支川吉田川において宮床ダムが1998年に竣工している。一方、沿岸域では鳴瀬川河口から石巻港に至る大曲海岸の侵食対策として1990年から2000年にかけてヘッドランドが8基設置されている(佐藤ら²⁾)。

3. 河口部の地形変化と波浪場への影響

(1) 近年の地形変化

図-2は、1989年10月、1995年12月及び2001年12月における汀線である。1989年の汀線は空中写真、1995年および2001年の汀線は宮城県石巻港湾事務所により行われた深浅測量を基にしている。1995年12月以降、左岸側の砂州がやせ細り、汀線が後退している様子が確認できる。左岸導流堤の東側(図右方向)に見られる鍵状の構造物がヘッドランドであり、1996年から1998年に暫定形状(ヘッド部なし)が施工され(佐藤ら²⁾)、その後2000年までにヘッド部が施工された。

また、図-3に図-2に示した3地点(a, b, c)における地盤高の経年変化図を示す。ここで、地盤高の基準高S.P.0.0m=T.P.0.0m-0.0873m(T.P.は東京湾中等潮位)である。a地点における地盤高は概ね1m程度の幅で変動し

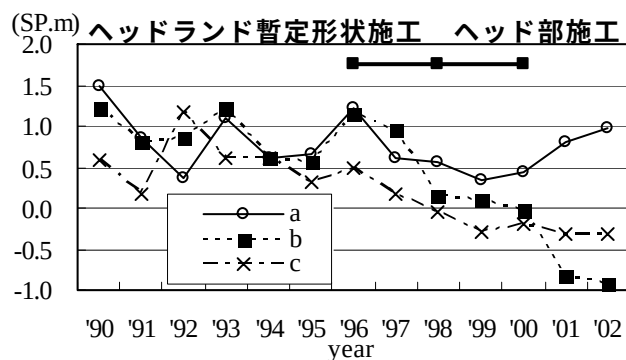


図-3 地盤高の経年変化



写真-1 鳴瀬川河口(2002年12月18日)

ているが、1997年からの減少傾向は2000年のヘッドランド完成後は回復傾向にある。一方、b地点及びc地点においては、1997年以降、地盤高が低下傾向(侵食)にある。石巻湾における沿岸漂砂の卓越方向は南西向き(図-2左向き)であることから(望月ら³⁾)、ヘッドランドにより沿岸漂砂の供給が制限されたことが侵食の主要因であると考えられる。

このように近年砂州の侵食が進行しているなか、2002年7月11日の出水により、導流堤左岸側の砂州はフラッシュされた。フラッシュされた砂州は元の安定形状に回復することなく写真-1に示すように河道内に侵入する挙動を示している。なお、近年における最も大きな洪水の一つである1986年8月洪水ではフラッシュされた砂州は数ヶ月で元の安定形状に回復していた。

(2) 波浪計算

地盤高の変化が波浪場に与える影響を調べるため、侵食が始まる前の1996年と2002年の地形における波高を数値シミュレーションにより算定した。浅海域における波浪計算には、浅水変形や屈折、反射などの波浪変形が表現可能なブシネスク方程式が広く用いられている。ここではWeiら⁴⁾がNwogu⁵⁾のモデルに高次精度の差分スキームを適用して浅瀬上での波高解析によりその有効性を検証し、高次の非線形項を含む形へと発展させた「拡張型の強非線形ブシネスクモデル(FUNWAVE)」を用いた。

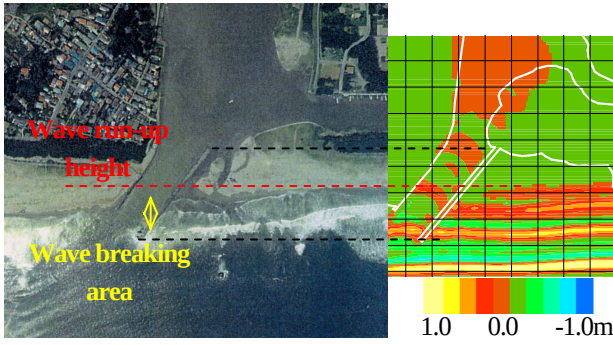


図-4 遡上高および碎波位置

このモデルを鳴瀬川河口部に適用したところ遡上高や碎波位置などの再現性が確認された。

計算領域の両側にはエネルギー減衰帯を設け、両側境界位置で無反射条件とした。また、計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 5\text{m}$ (格子数 90×200) とした。

図-4に1986年8月出水時における波浪条件で計算した場合の波高分布とそのときの空中写真を示す。シミュレーションでは導流堤の先端付近で碎波により水位が低下しており、空中写真においてもこの付近で碎波が生じている様子がうかがえる。また、遡上高さにおいても概ね再現できている。

(2) 砂州前面の水位差

2002年地形と1996年の2ケースの地形を対象にシミュレーションを行った。入射波の条件はどちらのケースも2002年7月の砂州フラッシュ後における最大遡上高発生時の条件である波高1.62m, 周期13.2sとした。

図-5に2002年地形での計算水位から1996年地形での計算水位を減じた水位差分布を示す。水位差はメッシュごとの最高水位の差であり、砂州上の水位差は表示していない。図中の赤いエリアが1996年に比べ水位が高くなっている箇所であり、砂州の前面で0.5m程度の水位上昇が見られる。近年の砂州の侵食により海底地盤高が低下することによって、砂州前面の波高が高くなったものと考えられる。

4. 地形変化シミュレーション

(1) 計算方法

上述のシミュレーションモデルにより算出した底面流速から漂砂量を算出し地形変化シミュレーションを行った。河口部周辺は定常流成分と振動成分の共存場であることから、それぞれの成分に分解して評価を行った。振動成分については時々刻々変化する流速に対してせん断応力を算出し、これらを総計し1周期あたりの正味の漂砂量を算出した。その後、砂の連続式を用いて水深変化量を算出し、波の作用時間を乗じて土砂移動量を算出した。

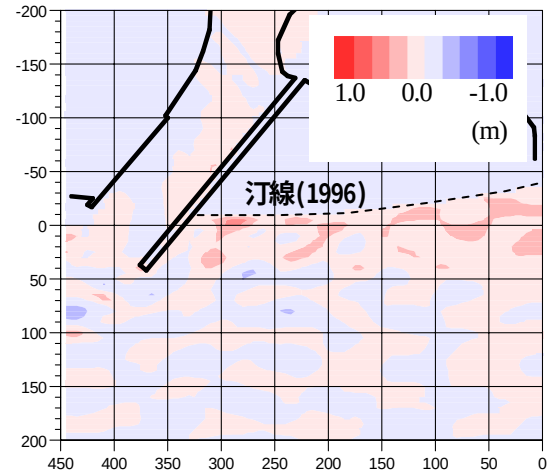


図-5 水位差分布

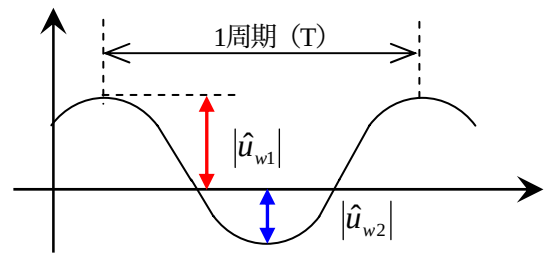


図-6 波動成分の振幅

定常流成分と振動流成分の共存場におけるせん断応力は、各々のせん断応力成分をベクトル的に合成した(1)式で算定した(南ら⁶⁾)。また、合成せん断応力の方向は(2)式ようになる。

$$\tau^2 = \tau_c^2 + \tau_w^2 + 2\tau_c\tau_w \cos \phi' \quad (1)$$

$$\tan \Theta = \frac{\tau_{cy} + \tau_{wy}}{\tau_{cx} + \tau_{wx}} \quad (2)$$

ここで、添え字cは定常流成分でありwは振動流成分を表し、 ϕ' は平均流速ベクトルと時々刻々の振動流流速ベクトルの交角である。また、添え字x, yはそれぞれx, y方向の成分を表す。共存場におけるそれぞれの成分のせん断応力は田中ら^{7,8)}を参考として以下の様にして算出した。

$$\begin{aligned} \tau_c &= \rho \frac{\kappa^2}{\{\ln(z_h/z_o) - 1\}^2} u_c^2 \frac{\hat{u}_{cw}^*}{u_c^*} \\ &= \frac{\kappa u_c \hat{u}_{cw}^*}{\ln(z_h/z_o) - 1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hat{\tau}_w = \rho \hat{u}_w^{*2} = \frac{\rho}{2} \exp \left\{ -7.33 + 8.07 \left(\frac{\hat{u}_w}{\sigma z_o} \right)^{-0.100} \right\} \hat{u}_w^2 \frac{\hat{u}_{cw}^*}{\hat{u}_w^*} \quad (4)$$

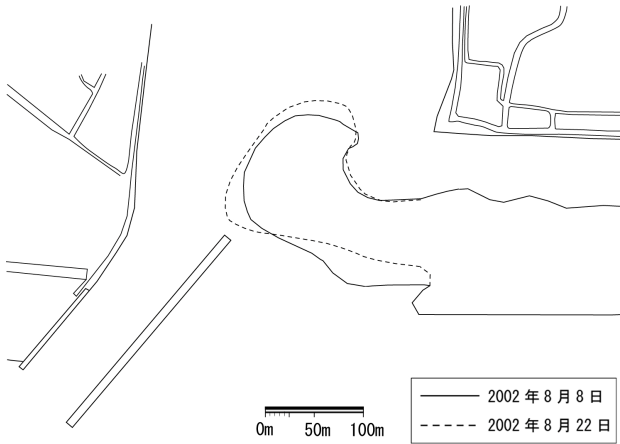


図-7 汀線図

$$\hat{u}_w^* = \left[\frac{1}{2} \exp \left\{ -7.33 + 8.07 \left(\frac{\hat{u}_w}{\sigma_z} \right)^{-0.100} \right\} \hat{u}_w^2 \hat{u}_{cw}^* \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$\bar{\tau}_w(t) = \frac{\bar{u}_w(t)}{\hat{u}_w} \hat{\tau}_w \quad (6)$$

$$\hat{u}_w = \frac{1}{2} (|\hat{u}_{w1}| + |\hat{u}_{w2}|) \quad (7)$$

ここで、 $\kappa(=0.4)$ はカルマン定数、 z_h は水深、 $z_0=k_s/30$ は粗度高さ、 k_s はニクラゼの相当粗度、 σ は波動の角周波数であり、 u_w^* 、 u_{cw}^* はそれぞれ振動流成分および共存場の摩擦速度である。また、上矢印はベクトル量を表し、上ハットマークは振幅を表す。式(7)に示した振動流流速成分の振幅は峰振幅と谷振幅の平均を用いた(図-6)。

時々刻々の漂砂量は、(1)式で算出したせん断応力を Einstein and Brownの公式にあてはめ算出した。この漂砂量は実質の漂砂量であるため、土砂の連続式を解く際には空隙率を考慮する必要がある。また、実地形の地形勾配や安息角を考慮するため、土砂の連続式は(8)式の様にした。ここで、 z_b は地盤高、 q_x 、 q_y はそれぞれx方向、y方向の実質の漂砂量を表す。また、 λ は空隙率を表し ε_s は正の値を持つ補正係数であり、ここでは $\lambda=0.4$ 、 $\varepsilon_s=0.2$ とした。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \right\} \quad (8)$$

(2) シミュレーション結果

2002年7月の出水後約1ヶ月毎に河口部の汀線測量と横断測量が行われている。測線は図-1に示した通りである。

図-7に2002年8月8日と8月22日における汀線を示す。砂州が河道内に20m程度侵入している様子が分かる。こ

表-1 土砂堆積量

計算値(m ³)	実測値(m ³)
8,700	8,200

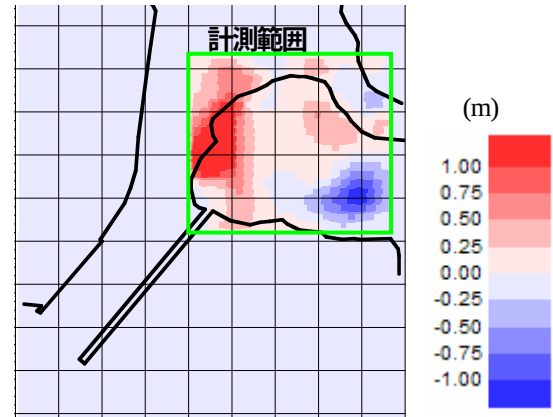


図-8 地盤高変化量(実測値)

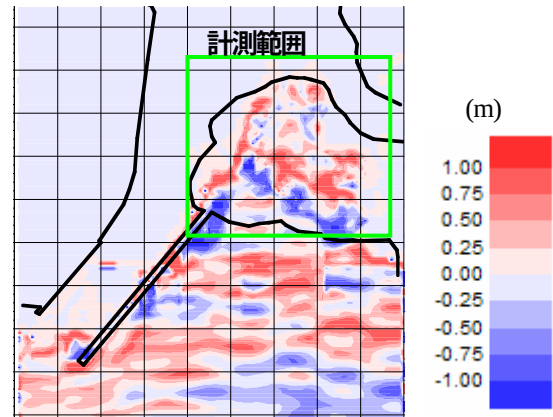


図-9 地盤高変化量(計算値)

の期間における土砂堆積量の変化量を図-8に示す。図中の赤エリアが堆積箇所、青エリアが侵食箇所である。図中の囲み範囲における土砂堆積量は概ね8,200m³である。

図-9にこの期間を対象にして地形変化シミュレーションを行った結果を示す。土砂堆積量の実測値を計測した範囲における土砂堆積量は8,700m³となった。

シミュレーションでは波浪のみを外力としており、鳴瀬川河口部周辺で卓越している南西向きの沿岸流(図-8、図-9左向き)の影響は考慮されていない。実測値では砂州西側に堆積箇所が集中し、地盤高が全体的にならされているのに対し、シミュレーションでは堆積、侵食箇所が分散して見られるのはこのためであると考えられる。ただし、シミュレーションにより算定した河道内の土砂堆積量は、良く実測値を再現していると言える(表-1)。また、地盤高の変化分布についても、砂州前面の東側(図中右側)において侵食が生じ、導流堤と砂州の間や砂州の裏側(河道内)に堆積が見られるなど、概ねの傾向はとらえられていると言える。

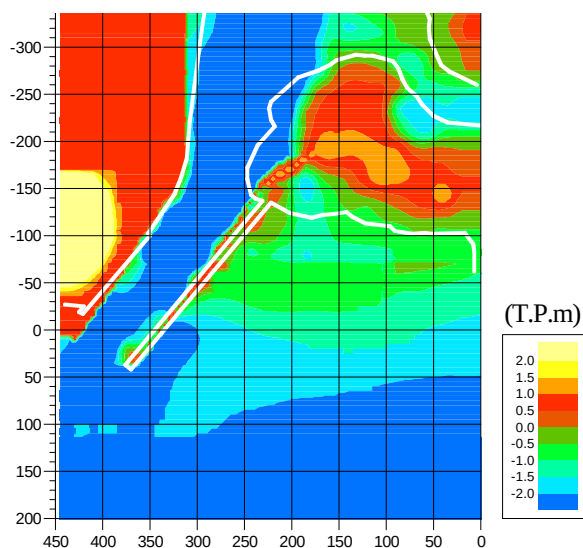


図-10 砂州地盤高 (ケース1)

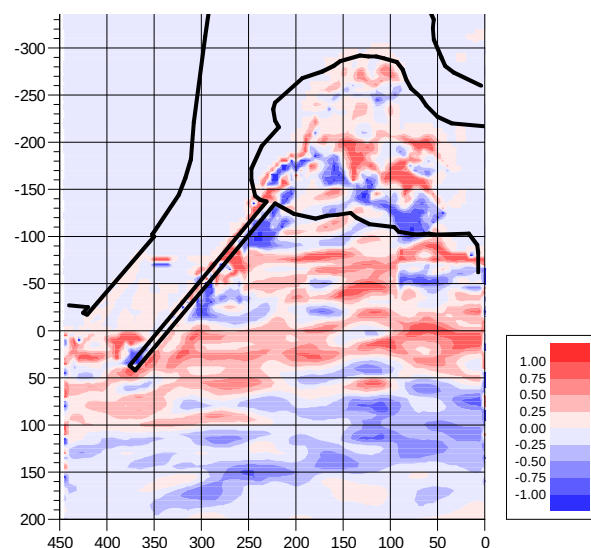


図-12 砂州地盤高 (ケース1)

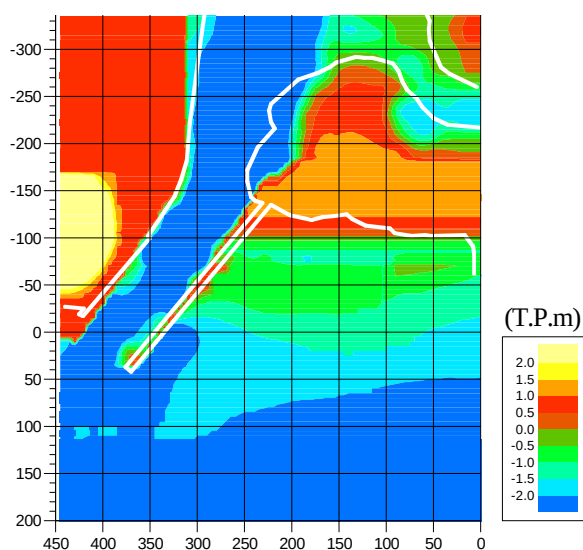


図-11 砂州地盤高 (ケース2)

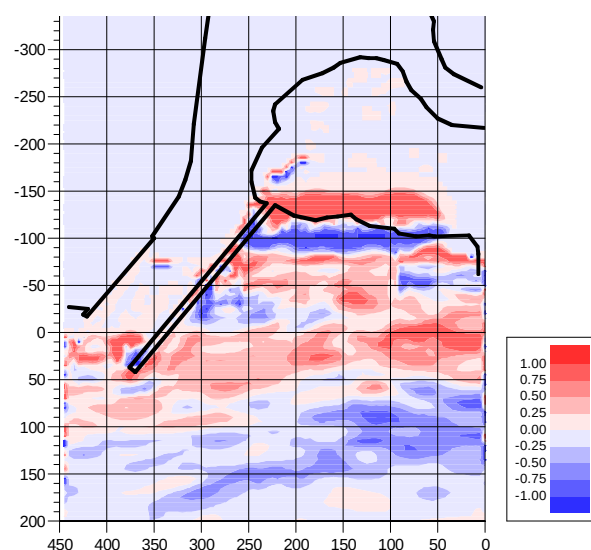


図-13 砂州地盤高 (ケース2)

河道内に堆積していた砂州の中央粒径が0.3mmであり、汀線付近の粒径とほぼ同じであったことや、この期間には河川からの出水が無かったことを考慮すると、この砂州の河道内侵入は主に波浪によりもたらされたものであると考えることができる。また、このシミュレーションモデルにより波浪による砂州の移動現象を再現することができた。

5. 砂州形状が砂州の河道内侵入に及ぼす影響

砂州形状が砂州の河道内侵入に及ぼす影響を調べるために、2002年7月出水によりフラッシュされた砂州形状を基本にして2種類の砂州形状を想定して計算を行った。

波浪条件は2002年7月のフラッシュ以降で最も波の遡上高が大きくなった時の条件である波高1.62m、周期13.2s、潮位S.P.+0.76mとした。また、計算時間はフラッシュ以降において計算遡上高が砂州高を連続して上回る

最長期間である18時間とした。

ケース1ではフラッシュにより形成された砂州と導流堤の間の水路を大型土嚢で接続することを想定し、幅10m、高さT.P.+1.4mの砂州を形成した。この高さは、フラッシュ後の砂州の最高値である。ケース2では、高さは同様にT.P.+1.4mとしたが、砂州の天端幅をフラッシュ前の天端幅相当の50mとした。図-10、図-11にそれぞれのケースの砂州形状を示す。

図-12、図-13にそれぞれケース1、ケース2における砂州地形を対象に地形変化シミュレーションを行った結果を示す。ケース1では河道内に土砂が堆積し、砂州の河道内侵入が見られる。一方、ケース2では砂州の上部に土砂が堆積しているものの、河道内における土砂堆積はほとんど見られない。このように砂州の形状によって砂州の河道内侵入量の程度は異なり、所定の幅を持つ砂州を形成することにより越波による砂州の河道内侵入を防ぐことができる。なお、ケース1、ケース2ともに導流堤内に堆積が見られるが、これは河川流量による土砂移動

を考慮してないためと考えられる。

このように砂州形状は河口地形の安定性を議論する上で極めて重要な因子となっている。我が国の河口には大規模な砂州が形成されることが多く、そのため導流堤による河口維持の事例が多く見られる。しかし近年、河口砂州が縮退し、河口内に押し込まれている事例が散見される（川村ら¹⁾）。ここで得た知見は、他河川での河口処理対策を検討する際に非常に有用であると考ええる。なお、河口地形の安定を長期に渡り維持するためには、一時的な土砂投入ばかりでなく、近年における沿岸漂砂量の変化等も考慮しながら定期的なフォローが必要であると考えられる。

6. 結論

本研究では、鳴瀬川河口域における近年の地形変化が波浪場に与える影響を明らかにするとともに、河道内侵入要因および砂州形状が砂州の河道内侵入に与える影響について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 鳴瀬川河口部周辺は、1996年頃まで安定した河口形状を維持してきたが、近年侵食が進んできており、このため砂州前面の波高が高くなる環境となっている。
- ・ 拡張型ブシネスク方程式を用いた地形変化シミュレーションにより算定した河道内の土砂堆積量と実測による堆積量との関係を調べた結果、両者は概ね一致しており、越波により砂州の河道内侵入が生じたことが示された。
- ・ 越波による砂州の河道内侵入を防止するためには、砂州高さのみならず砂州幅も重要な因子となることが示された。

- ・ ここで示した手法は波浪による砂州地形変化を再現していることから、他の現地河口部に対しても適用性が高いと考えられ、治水、利水、そして環境上問題となる砂州の河道内侵入対策を検討する際に有用な知見を得ることができる。

謝辞：本研究を行うに際し、貴重な資料を提供頂いた国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所、並びに宮城県石巻港湾事務所より各種資料を提供頂いた。ここに記して厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) 川村育男, 田中仁：中導流堤のある河口における砂州地形変化特性, 河川技術論文集, 第10巻, pp.357-362, 2004.
- 2) 佐藤慎司, 山本幸次, 和田一範, 伊澤武仁, 大谷靖朗, 橋本新：大曲海岸におけるヘッドランド周辺の漂砂観測と海浜変形予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.556-560, 1998.
- 3) 望月倫也, 宇多高明, 大類光男, 大谷靖郎：仙台湾北部沿岸の海浜変形の実態, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.369-373, 1990.
- 4) Wei, G. Kirby, J. T., Grilli, S. T. and Subramanya, R.: A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves, Journal of Fluid Mechanics, 1995.
- 5) Nwogu, O.: Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.119, No6, pp.618-638, 1993.
- 6) 南将人, 真野明：人工リーフ開口部の地形変化計算の一考察, 東北地域災害科学研究, 第40巻, pp.229-234, 2004.
- 7) 田中仁, 首藤伸夫：波・流れ共存時の底面摩擦に関する研究, 海岸工学論文集, 第27回, pp.163-167, 1980.
- 8) 田中仁：波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似式, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp.285-288, 1990.

(2006.9.30受付)