

鳴瀬川河口における砂州後退と河道内侵入機構

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

川村 育男¹・田中 仁²
Ikuo KAWAMURA, Hitoshi TANAKA

¹正会員 工修 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正会員 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 for these 46 years. 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, empirical orthogonal functions are applied. It is concluded that the decline of the sand bar has occurred by the construction of the headlands. Furthermore, 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.

Key Words : Naruse River, sand bar decline, sand bar intrusion, Empirical orthogonal functions, 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の上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っており、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、鳴瀬川河口における砂州地形変化の実態を明らかにするとともに、汀線の後退や砂州の河道内へ

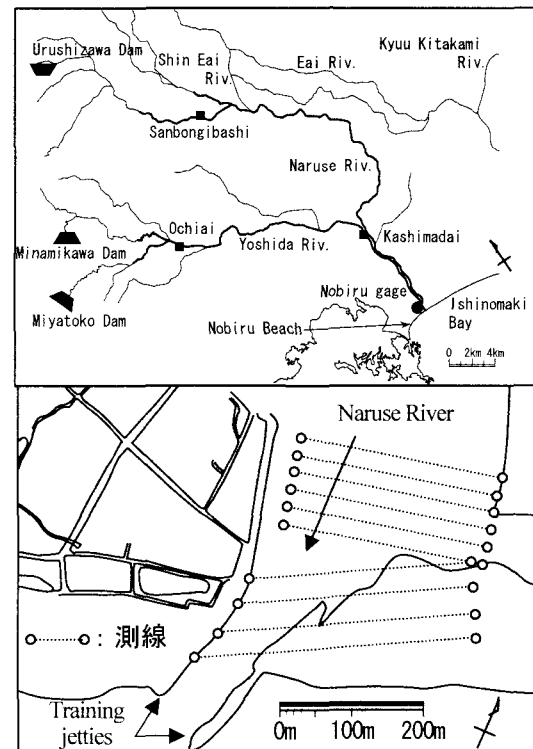
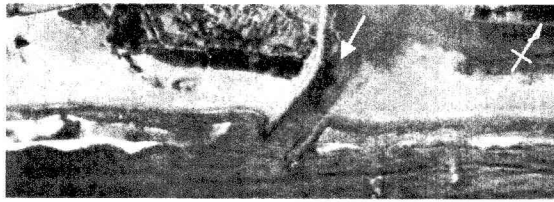
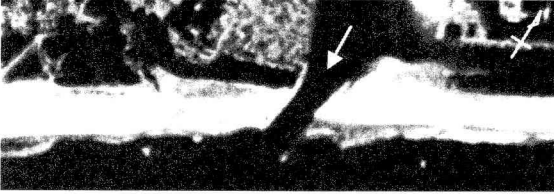


図-1 鳴瀬川河口の位置

の侵入現象の要因について検討を行った。



(a)



(b)

写真-1 鳴瀬川河口空中写真 (a)1956年, (b)1989年

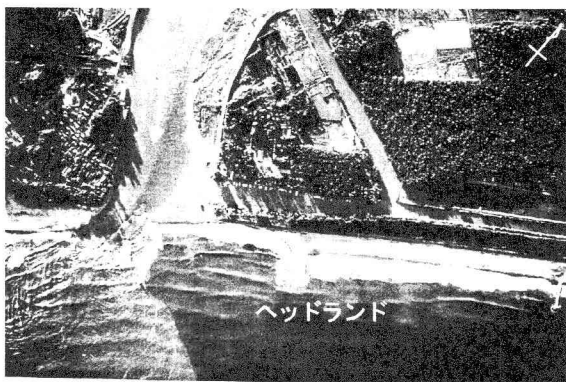


写真-2 鳴瀬川河口 (2002年7月11日)

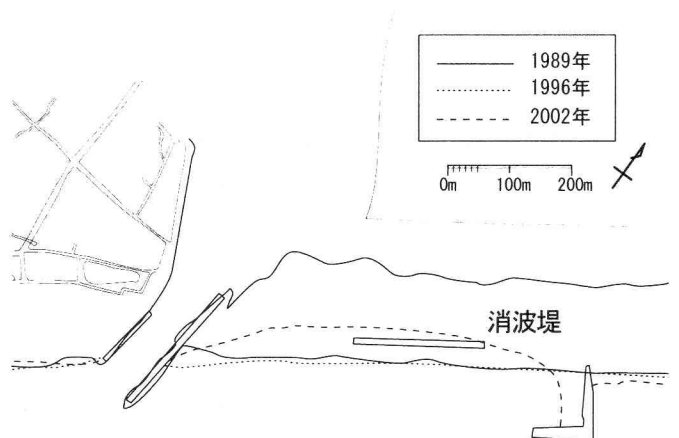


図-2 鳴瀬川河口部汀線

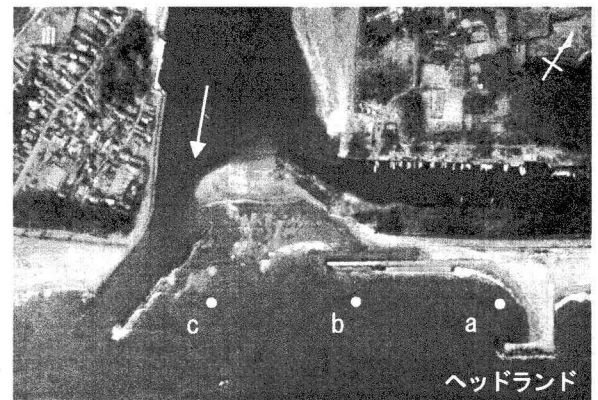


写真-3 鳴瀬川河口 (2002年12月18日)

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. 河口砂州地形

(1) 安定河口砂州形状

写真-1 (a), (b)はそれぞれ1956年, 1989年に撮影され

た河口地形である。河口部は二本の導流堤により維持されており、これらの写真に見られるように昭和30年代以降、安定した河口であった。

(2) 河口砂州の後退

図-2に、1990年, 1996年及び2002年における汀線を示す。1996年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。

(3) 2002年7月出水後の河口砂州地形

写真-2は、2002年7月11日の台風6号に伴う出水時の写真であり、ほぼピーク時の状況である。導流堤左岸側の河口砂州はフラッシュされている。左岸導流堤の東側（写真右方向）に見られる鍵状の構造物がヘッドランドであり、1990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。写真-3は2002年12月18日のものである。7月にフラッシュされた砂州が導流堤につながる形に回復することなく河道内に入り込んでいる様子が分かる。

写真-4は近年の最も大きな洪水の一つである1986年8月の出水時のものである。写真-2と同様に左岸側の砂州がフラッシュされている。写真-5は1986年12月のものである。同年8月にフラッシュされた左岸砂州は元の状態に回復している。

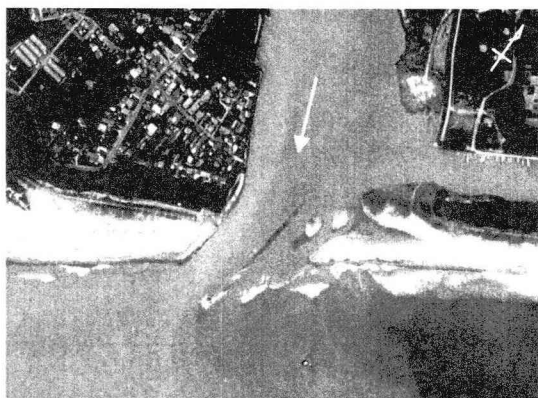


写真-4 鳴瀬川河口 (1986年8月6日)

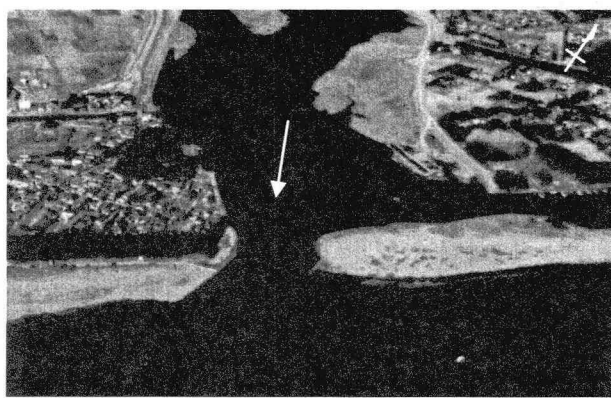


写真-5 鳴瀬川河口 (1986年12月27日)

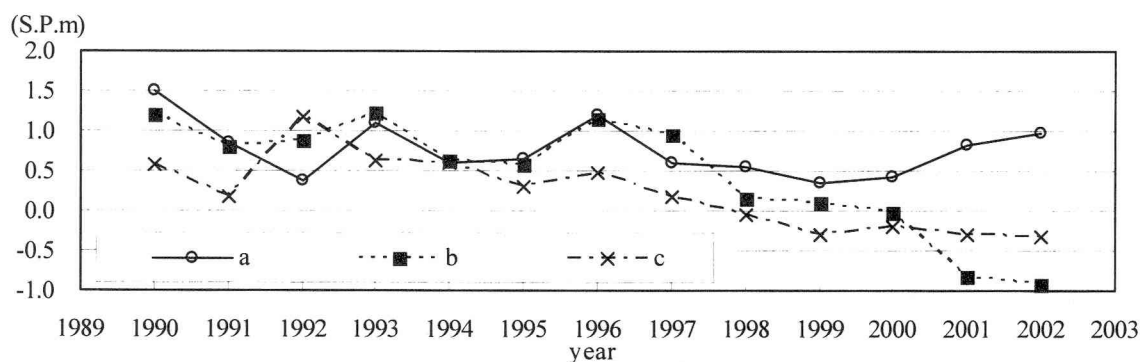


図-3 地盤高の経年変化

4. 河口地形の変動状況とその要因

(1) 近年の地形変化の概要

鳴瀬川河口部周辺域の深浅測量が宮城県石巻港湾事務所により1990年から2002年まで行われている。図-3に写真-3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地点においては地盤高に大きな変化は見られないが、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 (写真-3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な要因であると考えられる。また、写真-3からヘッドランドのヘッド部により形成された波の遮蔽域において堆積が生じていることが分かる。これは、波の遮蔽域形成に伴い漂砂の逆流現象が生じた結果であると考えられ、この逆流現象もb, c地点における侵食の要因であると考えられる。

(2) 経験的固有関数法による解析

上記の13年分の深浅測量データを用い、経験的固有関数法による分析を行った。この手法はWinant et al.⁴⁾により開発された地形変化を場所の関数と時間の関数との積に分離して表現する主成分分析の一つであり、地形の時

系列データを解析する有効な手段である。

ある測量年 t の地盤高を $H(x, y, t)$ 、全測量期間の平均の地盤高 $\bar{H}(x, y)$ をとすると平均地盤高からの変動量 $H'(x, y, t)$ は、式(1)で表せられる。

$$H'(x, y, t) = H(x, y, t) - \bar{H}(x, y) = \sum_n C_n(t) e_n(x, y) \quad (1)$$

ここで、 x, y は位置を表す格子番号、 $C_n(t)$ は時間に関する固有関数、 $e_n(x, y)$ は空間的な固有関数、 n はメッシュ数である。

空間的固有関数 $e_n(x, y)$ を固有値の大きいものから二つ選んで図-4に示した (大きい方から順に添字1, 2をつける)。また、図-5に時間固有関数 $C_n(t)$ を示す。寄与率は第一成分が40.5%で、第二成分が20.6%である。式(1)より、地盤高の変動量 $H'(x, y, t)$ は $e_n(x, y)$ と $C_n(t)$ の積で表されるため、 $e_n > 0$ の地点では $dC_n/dt > 0$ の場合には地盤高上昇傾向 (堆積)、 $dC_n/dt < 0$ の場合に低下傾向 (侵食) となる。 $e_n < 0$ の場合には、これと逆の関係になる。

第一成分の $e_1(x, y)$ については、ヘッドランドから河口導流堤付近まで正の値を持つことが分かる。ここで、1998年から2000年にかけて $dC_1/dt < 0$ となっているため、この時期にヘッドランド～河口エリアで侵食が生じていたことが分かる。このことはヘッドランドが設置された時期と対応しているため、沿岸漂砂量の減少や沿岸漂砂の逆流現象が主な要因と考えられる。

一方、第二成分の $e_2(x, y)$ は、導流堤先端の沖側で正の

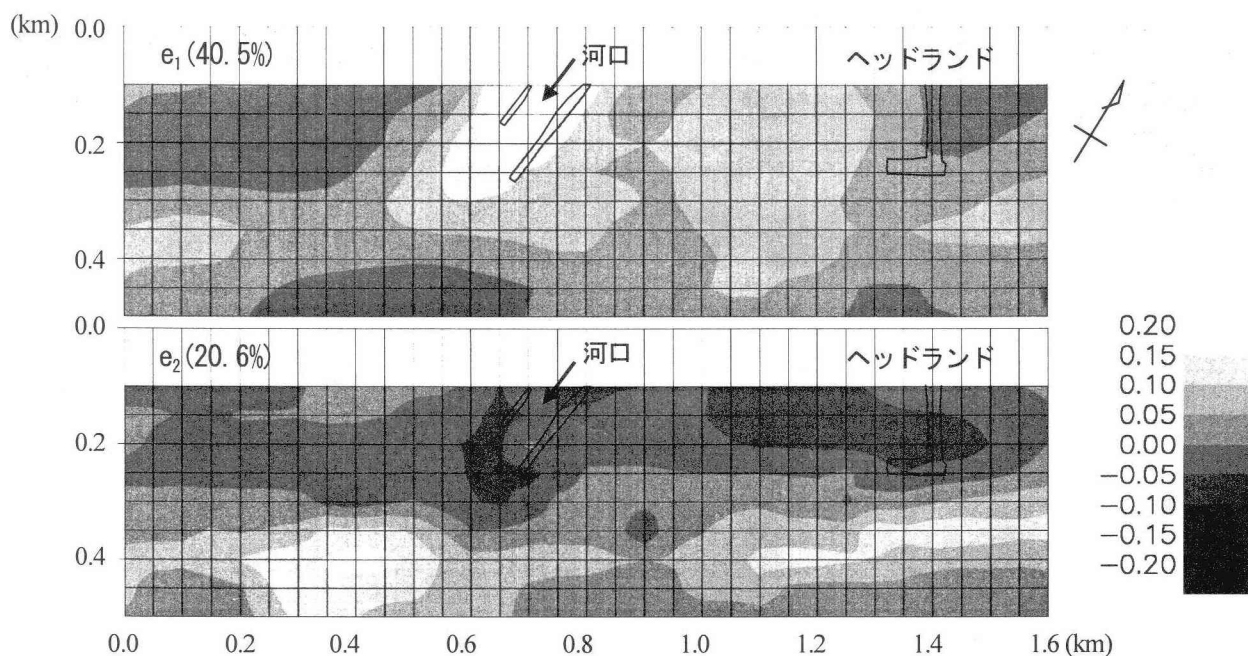


図-4 空間固有関数分布

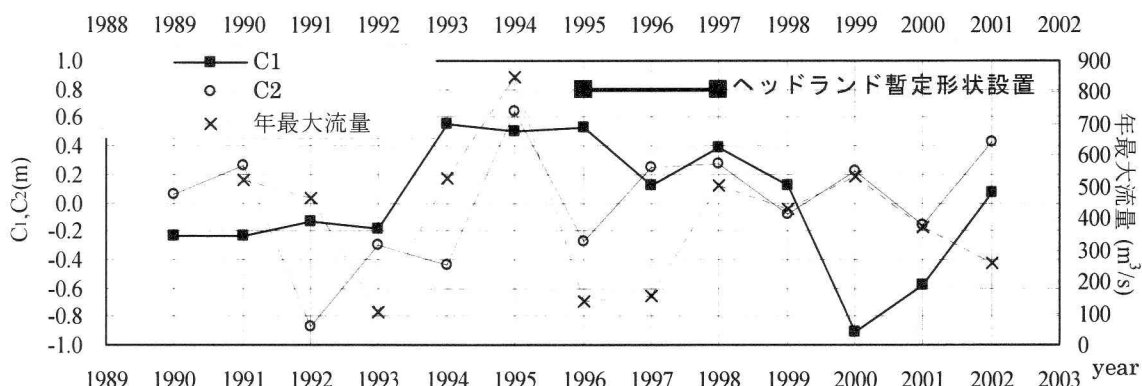


図-5 時間固有関数分布

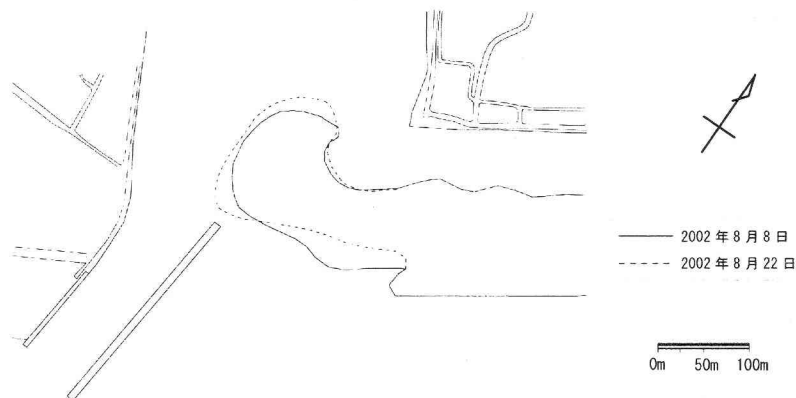


図-6 汀線図

値を示している。これに対応する $C_2(t)$ の変化を見ると1993年から1995年にかけて $dC_2/dt > 0$ となっている。 $C_2(t)$ と鳴瀬川三本木地点の年最大日平均流量の関係を見ると、前年の年最大流量と $C_2(t)$ がよく対応していることが分かる(図-5)。このことから、第二成分は河川からの供給土砂に関係するものであると考えられる。

5. 砂州の河道侵入時における土砂移動量の算定

(1) 土砂移動量の実測量

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。

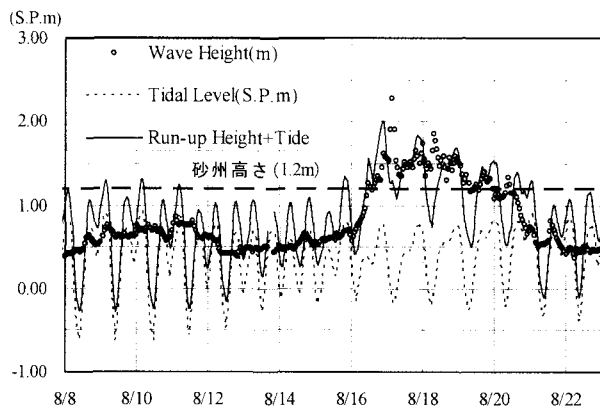


図-7 砂州への打ち上げ高さ

図-6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。この間における土砂堆積量の変化量を横断面図から算出した結果、概ね8,200m³となった。

(2) 土砂堆積量と波浪条件との関係

上述したように2002年8月8日から8月22日にかけて砂州の河道内侵入が確認されたが、この間には大きな出水は無く、河道内に堆積した砂州の中央粒径が約0.3mmであり汀線付近の粒径とほぼ一致していることから、砂州の変動量は概ね波浪によるものと考えられる。Ogawa・Shuto⁵⁾によれば、波の打ち上げ高 Ru は以下のように表される。

$$\frac{Ru}{H_0} = 0.46s^{-0.12} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.2} \left[3.04s^{1.07} - \frac{2.94\pi\zeta^2 A^2}{F^2} s^{-0.09} m^2 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.75} \right] + \pi A \zeta^2 m^2 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 H_0 ：沖波波高、 L_0 ：沖波波長、 s ：斜面勾配、 m ：前浜勾配、 β 、 ζ 、 A 、 F ：諸係数である。斜面勾配は平成3年から平成13年までの深浅測量の結果から $s=1/20$ 、 $m=1/10$ として打ち上げ高さを算出し、潮位の変動を考慮して、砂州前面における打ち上げ高さを算出した。

図-7に1/3有義波データから算出した打ち上げ高さを示す。2002年8月16日から20日にかけて、砂州高（約S.P.+1.2m）を越える波が継続している。

土砂移動量を定量的に把握するために、波の打ち上げ高から越波量とこれに伴う土砂移動量の算出を行った。越波量は富永ら⁶⁾による次式を用いる。

$$Q = \alpha(R - H_c)^n \quad (2)$$

ここで、 $Q(\text{cm}^3/\text{cm})$ ：1波あたりの越波量、 $R(\text{cm})$ ：打ち

表-1 越波量、堆積土砂量及び土砂濃度

越波量累計値 $Q_{\text{total}}(\text{m}^3)$	堆積土砂量 推定値(m^3)	堆積土砂量 実測値(m^3)
240,000	9,600	8,200

上げ高さ、 $H_c(\text{cm})$ ：砂州高さである。ここで、 α と n は、 $\alpha=0.5$ 、 $n=2.0$ とした。現地に適用する際は潮位変動も考慮する必要があるので、上式を(3)式のようにした。

$$Q = \alpha(R + \text{Tide} - H_c)^n \quad (3)$$

ここで、 $\text{Tide}(\text{cm})$ ：潮位である。打ち上げ高さは式(2)を用いた。

以上の手法を用い2002年8月8日から8月22日における累計の越波量 Q_{total} を算出した。この越波量に土砂濃度 C_s を乗じることにより堆積土砂量が算出される。

Kobayashi et al.⁷⁾は砂丘上の越波実験を行い、 $C_s=0.023 \sim 0.056$ を得ている。また、田中ら⁸⁾はラグーンにおける堆積土砂量から $C_s=0.038 \sim 0.116$ を得ている。ここでは、これらの値を参考に $C_s=0.04$ を用いて土砂量を算出した。結果を表-1に示す。本手法により算出した堆積土砂量は概ね実測値を捉えている。

上述したように砂州地盤高は1996年から低下する傾向が見られたが、それ以前には砂州高はS.P.+2.0m～2.5m程度あったため、図-7から越波は生じないことが分かる。このことから、前述した1986年のフラッシュ時には、越波による砂州の河道内への押し込みが生じなかったため砂州が元の安定形状に回復しやすかったものと考えられる。

このように、河口砂州高さは河口地形の安定性を議論する上できわ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⁹⁾）。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の実態を明らかにするとともに、砂州の後退要因及び砂州の河道内侵入要因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。

- ・ 鳴瀬川河口は、これまで長期にわたり安定した河口形状を維持してきたが、1996年以降ヘッドランドから河口間の汀線が後退し始め、一様に地盤高が低下する傾向が確認された。

- ・ 2002年7月の出水でフラッシュされた左岸砂州が河道内に侵入する現象が確認された。この現象は近年見られなかったものである。
- ・ 経験的固有関数法による分析を行った結果、第一成分の寄与率は約40%、第二成分は約20%であった。第一成分は主にヘッドランド～河口域の侵食を示しており、ヘッドランドの建設と関係が深いと考えられる。一方、第二成分は河川流量との関係が見られることから河川からの供給土砂に伴う堆積に関係するものであると推察された。
- ・ 観測された波浪データを基に計算した越波量と鳴瀬川河口内での土砂堆積量との関係を調べた結果、両者は概ね整合しており、越波により砂州の河道内侵入が生じたことが示された。
- ・ ヘッドランドの設置前の砂州高では越波が生じないため、河道内への砂州侵入はヘッドランドの設置に伴う砂州高の低下が主な要因であると推察できる。
- ・ ここで示した手法から、波浪条件、砂州形状を基に輸送土砂量を算定することができ、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) Winant, D. C., D. L. Inman and C. E. Nordstrom: Discription of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, J. G. R., Vol. 80, No. 15., pp.1979-1986, 1975.
- 5) Ogawa, Y. and N. Shuto : Run-up of periodic waves on beaches of non-uniform slope, Proc. 19th Int. Conf. on Coast. Engng., pp. 328-344, 1984.
- 6) 富永正照, 佐久間襄：海岸堤防に関する研究(11), 土木研究所報告 143-3, 36p, 1972.
- 7) Kobayashi, N., Y. Tega and M. W. Hancock : Wave reflection and overwash of dunes, Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 150-153, 1996.
- 8) 田中仁, 山内健二：バリアー・アイランド上の越波によるラグーンでの土砂堆積, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.646-650, 1997.

(2004. 9. 30 受付)