

河口砂州内浸透流に関する研究

Field Observation of Infiltration Flow in a Sand Spit at the Mouth of Nanakita River

根本 徹¹・田中 仁²・山路弘人³

Toru NEMOTO, Hitoshi TANAKA and Hiroto YAMAJI

Development of sand spit can frequently be observed at river mouths in Japan due to predominant action of waves as compared with flushing by river discharge. Progress of river mouth closure may cause reduction in flow through a river opening, resulting in increase in infiltration flow through a sand spit at a river entrance. However, there have been quite few investigation on this type of flow, although there have been many on coastal aquifer. In the present study, results of field observation of infiltration flow in a sand spit at the mouth of Nanakita River are described. Comprehensive numerical simulation is also performed to investigate the effect of water level variation in the mouth on the strength of infiltration flow.

1. はじめに

わが国の河口部には大規模な砂州が形成され、閉塞気味の地形を示す箇所が少なくない。河口開口部が狭窄する時、河川流・潮汐流は開口部を流下するのみならず、砂州内部も浸透する。河口が閉塞気味であれば、河口内水位の変動が緩慢となるために、潮位と河口内部の水位との間には水面勾配が生じやすく、より浸透流が生じやすくなる。このため、開口部を維持するための流量が低減し、閉塞を助長する効果を持つ。一方で、浸透による水質浄化は砂州周辺の感潮域生物環境にも影響を及ぼしているものと考えられる。しかし、その実態についてはこれまでほとんど検討されていない。

砂浜海岸における砂層内浸透流に関しては、地下水低下による前浜地形の制御工法などと関連して、多くの研究がなされている(例えば、片山ら, 1992; 佐藤ら, 1996; 内山, 2001)。これらの研究においては、海域側で境界条件が与えられた時の地下水の応答が検討対象となるが、河口砂州においては海側のみならず河口側の水位も変動があり、両側で境界が与えられる。また、河口内水位の変動は河口部の閉塞状況に大きく依存している(例えば、田中, 1995)。閉塞の進行は浸透流を助長し、これにより河口開口部を通過する流量の低減に通じ、このように、浸透流と河口閉塞は相互に影響を及ぼしあう関係にある。これに対し、一般の海浜では潮汐条件が浸透流の境界条件として一方的に与えられ、地形と浸透流の間に interactive なプロセスは存在しない。この点で、河口部の現象と通常の高浜の現象には根本的な相違がある。

そこで本研究では、このような河口砂州内の浸透流の

存在を現地観測により確認し、さらに数値シミュレーション結果と合わせてその基本的特性を解明することを目的とする。

2. 調査対象の概要と調査内容

研究対象である七北田川は仙台市蒲生地先で仙台湾に注ぐ二級河川であり、一年を通して砂州の大きな河口変形が生じることが報告されている(田中, 1995; 稲村・田中, 1998)。図-1 に七北田川河口を示す。ただし、近年においては図-1 に見られるように安定した右岸砂州の卓越が確認されている(Tanaka・Srivihok, 2004)。写真は 2005 年 11 月に撮影された空中写真である。

観測地点は図-1 に黒丸で示した場所において行い、

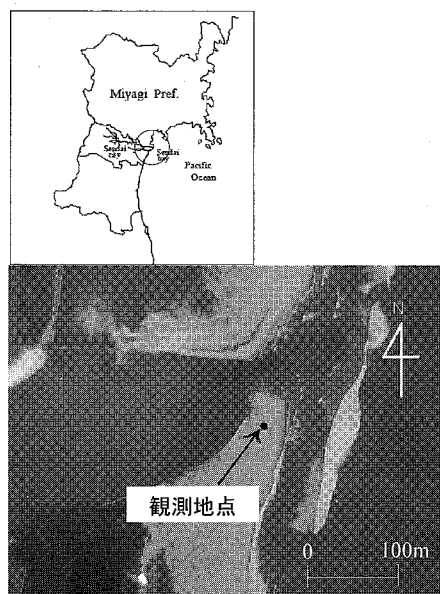


図-1 七北田川概略図及び河口地形

1 正会員 (株)建設技術研究所
2 フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科
3 正会員 東北大学助手 大学院工学研究科



図-2 計器の設置状況

砂面から 1.7 m 下に水位計 (コーナースステム社, KADEC21-MIZU-C), 地下水流速計 (アレック電子, GFD3), CT 計 (同, ACT-HR), DO 計 (同, ACT-HR) を設置した. 計器の設置状況を図-2 に示す. 地下水流速計は, 円形断面の円周方向に配置された 16 個のセンサーにより計測を行う. 水流に面しているセンサーは温度が低く, その反対側では高くなることから, 円周方向の温度差を知ることにより地下水の流向流速を計測する.

実測は 2006 年 11 月 4 日の 12 時から 9 日の 12 時まで行われた. なお, 流速データについて一部欠損がみられたが, 砂州内の浸透を考察する上で支障はなかった. さらに, 仙台港での 1 時間ごとの潮位データおよび仙台港沖での 2 時間ごとの波浪データを入手した. また, 河口内においても, 開口部より上流 500 m の位置で, メモリー式水位計による水位観測を行った.

3. 観測結果

図-3 には実測により得られた水位 η (仙台港潮位, 砂州内の地下水位, 河口内の水位), $d\eta/dt$ (砂州内水位

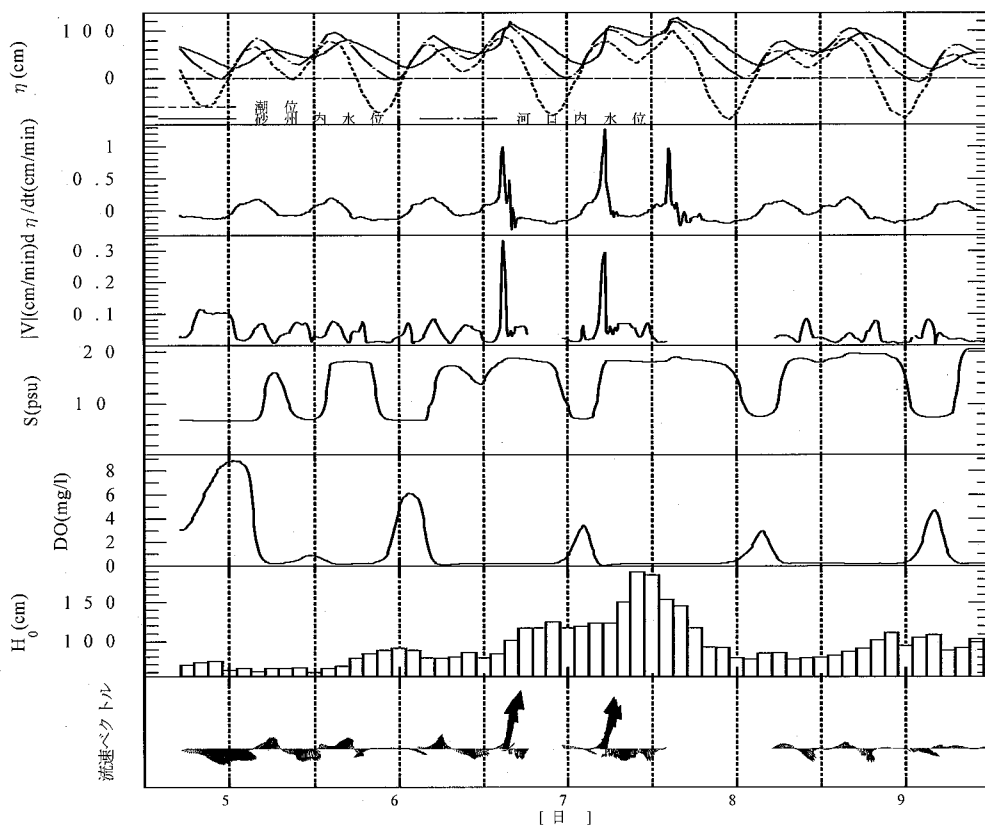


図-3 七北田川における観測結果 (2006 年 11 月 5 日～9 日)

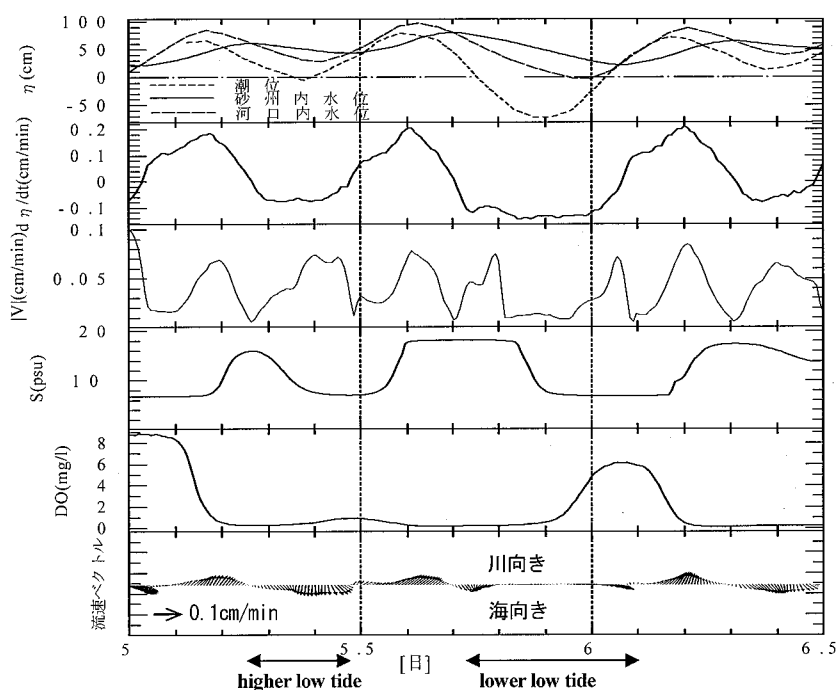


図-4 高干潮時と低干潮時の水理特性の相違

の時間変化), 地下水流速の絶対値 $|u|$, 塩分濃度 S , 溶存酸素 DO , 沖波波高 H_0 , および流速ベクトルの変動を示す。

図-3 より, 潮位の変動に応じて, 砂州内にも水位変動が生じ, 砂州内の流れが海向き, 河川向きと周期的な変動を繰り返していることが分かる。また, 流速は最大で 0.1 cm/min と, きわめて微弱なものである。また, 流速ベクトルは高干潮と低干潮で挙動が異なることが見て取れる。塩分濃度は砂州内水位に対応しており水位が低くなるときに濃度も小さくなる。それに対し, 溶存酸素は砂州内水位が低くなるときに増加することが観測された。なお, 7日の半ばには波高 2 m 弱の高波浪が来襲している。このため, 現場において砂州を越える越波が生じたことを確認した。これにより, 河口内に向かう流速が増加している。また, 砂州内水位は河口内水位を上回っていることが分かる。

図-3 に示した実測結果のうち, 越波が生じる前の11月5日, 6日の観測結果を拡大して図-4 に示す。上段に示した3つの水位のうち, 砂州内の地下水面は, 他者に比べて大きな位相のずれを伴っていることが分かる。また, 時刻により3つの水位の上下関係が変化し, これらが交差する時刻は砂州内流向が変化するタイミングに一致している。この様に, 砂州内の流速は河口内外の水位差に連動して変化していることが確認された。

図-4 において, 高干潮時 (higher low tide) と低干潮

時 (lower low tide) の流速挙動に相違が見られる点は興味深い。高干潮時の下げ潮初期では徐々に流速値が増しており, 高干潮と低干潮とで同様な挙動を示している。これに対して, その後の時間では, 高干潮時にさらに流速が増加するのに対して, 低干潮時では急激に流速が低減している。本来, 低干潮時には河口内外で大きな水位差がつくために, より大きな流速が発生すると予想されたが, それと反する実測結果となった。

4. 数値シミュレーション

上記の様に, 実測された流速は水位差から想定される流速値と異なる特性を示したことから, 砂州内における浸透流の実態を解明するために, 非定常浸透流の基礎式を用いて数値シミュレーションを行った。砂州の長さが上下流の水位差に比べて十分に長いので, 流れを準一様流と考えることが出来る。そこで, 自由表面の境界条件を考慮することにより, 次の一次元の基本式を使用する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで, η : 砂州内の浸潤面高さ, t : 時間, x : 水平座標であり, 左辺の係数 a は次式のように定義される。

$$a = \frac{kh_0}{\lambda} \quad (2)$$

ここで, λ : 浸透層の空隙率, k : 透水係数, h_0 : 平均水深である。この式より砂州内の流れのシミュレーショ

ンを行った。その際、砂州部を対象とする計算領域の両端において、実測された河川水位と wave set-up を考慮した潮位を与えた。

(1) 現地観測結果の再現計算

七北田川河口内においては、高波浪時に wave set-up による水面の上昇が顕著であることが知られている。そこで、上記の様に仙台港での潮位に wave set-up による水位上昇を加算して海側の境界条件 η_s とした。一方、河川側水位には河口内の実測水位を与えた。

図-5 に数値計算によって求められた観測地点での水位計算値と実測水位の比較を示す。この図から、砂州内水位の計算値はほぼ実測値と一致している事が見てとれる。なお、式(2)で定義される係数を $a=0.018 \text{ m}^2/\text{s}$ としており、この時にもっとも良好な計算結果を得た。数値計算では越波現象を考慮していないため、矢印の期間には差違が見られる。図-6 は流速の計算結果であり、やはり越波が生じた時間帯を除けば、良好な一致が見られる。

図-7 には砂州内の水位の時間的な変動を示す。横軸

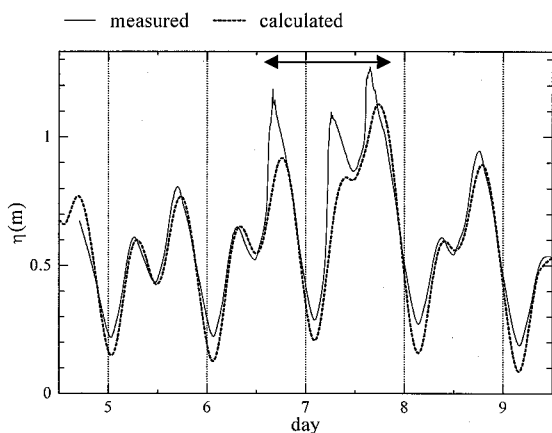


図-5 砂州内水位の実測値と計算値の比較

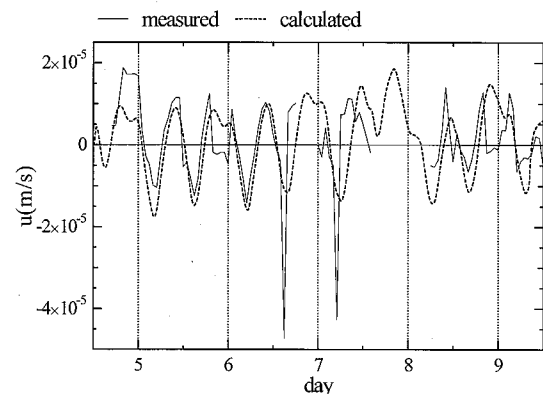


図-6 砂州内流速の実測値と計算値の比較

は砂州幅方向の座標であり、曲線は数時間毎の水位を抜き出したものである。これより、浸透流は海側・河川側の双方から砂州内に向かって伝搬し、海・河川間の水位差に基づく流れでは無いことが分かる。これより、図-5 (B) の低干潮時に見られたより微弱な流れは、これに先行する高干潮 (A) に伴う流れが時間差を伴って観測場所に伝搬して来た現象であることが判明した。

(2) 河川側境界水位の影響に関する数値実験

河口内の水位は、河口の閉塞状況に応じてその変動パターンが変化する。特に中小河川においてはこのことが顕著である (Mehta・Ozsoy, 1978; 田中, 1995; 田中・李, 2006)。そこで、次式により海側潮位 η_s ・河川側水位 η_R を与えて、数値実験を行った。

$$\eta_s = A_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_R = \gamma A_0 \sin \{ \omega (t - \Delta t) \} \omega t + a_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A_0 : 潮位振幅 (=0.5 m), ω : 潮汐の角振動数 (半日周潮を対象とする), γ : 係数, Δt : 河口水位の位相の遅れ, a_0 : 河口内水位の平均的せき上げ高さである。河口の閉塞に伴い、河口内水位がせき上げられることが

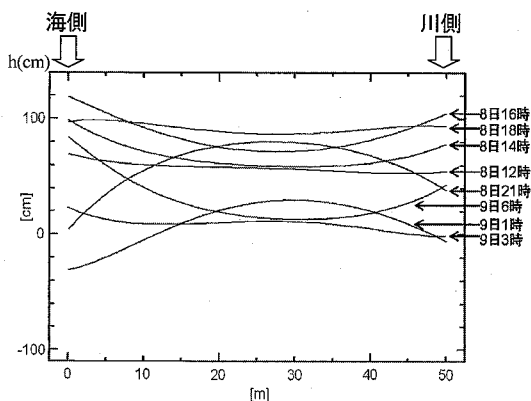


図-7 砂州内の水面高さの時間変化

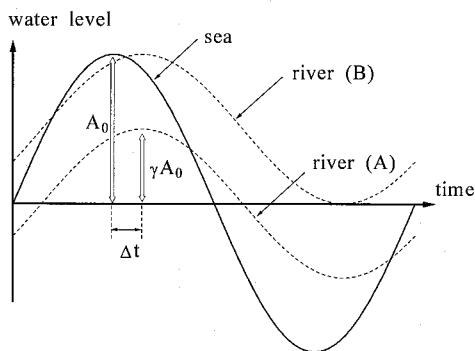


図-8 水位境界条件の与え方

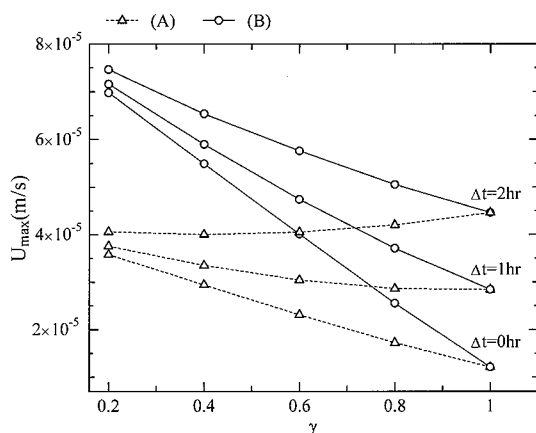


図-9 河川側水位に対する流速の依存性

あるため、図-8に示すように、式(4)において $a_0=0$ とした場合 (river (A) の波形) と、満潮時の水位を潮位に一致させたせき上げを考慮した場合 (river (B) の波形) の二つのケースを与えた。他の条件は、図-7の計算を行った七北田川の条件に一致させた。

適当な初期条件より計算を開始し、周期的な解が得られた段階について比較を行った。

図-9に数値計算の結果を示す。同図では、実測を行った箇所での流速の最大値 U_{max} について比較を行っている。せき上げを考慮しない(A)のケースでは、位相差が増加するにつれて、また、河口内流速の振幅低減が顕在化するにつれて流速値が増しており、河口内水位・潮位の水位差の重要性を示している。ただし、 $\Delta t=2$ 時間の計算結果を γ の減少とともに、他の二ケースと幾分異なる傾向を示している。

せき上げを考慮した(B)のケースでは、 γ の減少に伴う流速値の増加が顕著に認められ、河口内水位・潮位の水位差の存在が流速値の増加に大きく寄与していることが確認された。

5. おわりに

仙台市七北田川河口砂州内の浸透流の挙動に関する現

地観測を実施した。その結果、潮位変動による水位差により、砂州内に浸透流が生じていることが確認された。また、干潮時の流速ベクトルの挙動は、高干潮時と低干潮時で異なっている。なお、潮位変動に伴い、DO値も変動を示すが、その機構に関してはさらなる考察が必要である。

謝辞：本研究を行うに際し、国土交通省東北地方整備局塩釜港湾空港工事事務所より仙台港潮位データの提供を受けた。また、現地調査にあたり、(株)アレック電子から様々な協力を得た。さらに、本研究に対して日本学術振興会科学研究費(基盤研究(B), No.17360230)の補助を受けている。ここに記して、関係各位に対し深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 稲村武彦・田中 仁(1998):七北田川河口の完全閉鎖条件に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 601-605.
- 内山雄介(2001):砂浜海岸帯水層における潮位変動に伴う循環流の形成機構, 土木学会論文集, No. 670/II-54, pp. 37-48.
- 片山 忠・黒川 誠・柳嶋慎一・加藤一正・長谷川巖(1992):透水層設置による前浜地下水位の制御, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 871-875.
- 佐藤勝弘・妻夫木一秀・野口雄二・岩佐直人(1996):透水層埋設による地下水位低下に関する3次元予測計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 656-660.
- 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, No. 509/II-30, pp. 69-181.
- 田中 仁・李 炫錫(2006):wave set-upによる河口感潮域の水位上昇に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. 62, No. 2, pp. 210-223.
- Mehta, A.J. and E. Ozsoy (1978): Inlet Hydraulics, in Stability of Tidal Inlets, ed. Bruun, P., Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 83-108.
- Tanaka, H. and P. Srivihok (2004): Impact of port construction on coastal and river mouth morphology -a case study at Sendai Port-, Proceedings of 9th International Symposium on River Sedimentation, pp. 406-415.