

河口閉塞と wave set-up が感潮域塩分環境に及ぼす影響の定量的評価

Nguyen Trung Viet¹・田中 仁²・山路弘人³

河口内への塩水遡上を支配する外力としては、河川流量および潮汐変動が一義的に重要である。この他の要因として、河口地形や波浪も有意な影響を有する場合が考えられる。ただし、これまでのそのような観点での検討事例は見られない。そこで、二級河川・七北田川を対象として、異なる地形条件のもとでの塩水遡上に関する現地調査を実施した。また、 σ 座標系を用いた三次元モデルにより数値計算を行い、その再現計算を行った。さらに、数値計算における地形および波浪に関する設定条件を様々に変化させた仮想的な数値計算を実施し、河口内の塩分変動に対する河口地形・波浪の影響に関して定量的な評価を行った。

1. はじめに

感潮域における塩分変動については、これまで主に河川流量と潮汐とを主たる外力として議論がなされてきた。一方、河口閉塞は、洪水時のせき上げをもたらし要因として、主に治水上の視点で扱われた。しかし、閉塞が生じる河口においては、地形変動が塩分環境に及ぼす影響を無視することは出来ない。例えば、閉塞による塩分低下は生物環境に大きなインパクトとなる。また、河口前面水深が浅い時には、碎波により wave set-up が生じる (例えば、Hanslow ら, 1996 ; Tanaka・Lee, 2003)。この水面上昇は、現象的に潮位振幅が増加することと等価な効果を持ち、タイダルプリズムの増加がもたらされる。

これまで、このような河口閉塞および wave set-up が感潮域塩分環境に与える影響に関する評価はほとんどなされていない。著者らの研究グループでは現地観測およびニューラルネットワーク (ANN) による検討を行っている (遠藤ら, 2004 ; Nguyen ら, 2006) が、ANN 自身は物理過程を反映したモデルではないことから、計算結果の精度に問題点を残していた。

ここでは、二級河川・七北田川を研究対象とし、現地調査により、河口地形変動と感潮域塩分との関係を現地調査により明らかにするとともに、物理過程を反映した数値モデルにより、これら二つの要因が塩分に与える影響に関する定量的検討を行った。

2. 研究対象

七北田川はその源を宮城県・山形県境に発し、仙台市北部を東に流れて仙台湾に注ぐ二級河川である (図-1)。流域面積は 229 km²、幹川流路延長は約 45 km である。

七北田川河口部には、全国的にも有名な渡り鳥の飛来地であり市民の憩いの場所ともなっている蒲生干潟がある。しかし、近年漂砂の押し込みや侵入塩分量の上昇などによる環境面での悪化がみられる。このため、これまで同河口感潮域を対象に多くの調査・研究がなされてきた (栗原, 1980 ; 上原, 1984 ; 山本・田中, 2000 ; 遠藤ら, 2004)。また、環境省の「自然再生事業」の対象地区となり、現在、干潟再生のための検討が行われている。このような背景から、七北田川感潮域において塩分変動特性の定量的な評価が求められている。

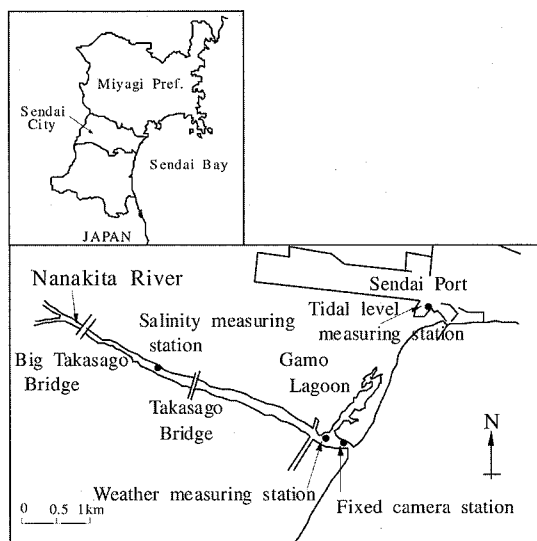


図-1 七北田川感潮域

3. 現地調査内容

現地調査は 2005 年 8 月および同年 12 月に実施された。現地調査において取得したデータを下記に列記する。なお、それぞれの測点を図-1 に示している。

(1) 塩分変動

河口部から約 3 km 地点において塩分計 (アレック電

1 学生会員 M.Eng. 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
2 フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
3 正会員 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻

子, MDS-T) により連続観測を行った。測点は河床から 80 cm および 30 cm の二点である。予備調査により, 各種外力の変動に伴い, この付近において顕著な塩分変動が見られることから, この箇所を選定した。塩分データの取得間隔は 10 分間である。

(2) 風速・風向

河口より 500 m 地点で, 気象計 (DAVIS, Weather Monitor II) により, 地表から 4 m で風速・風向の観測を行った。

(3) 河口地形

河口部から 200 m の地点に設置した自動画像記録装置 (図-2) により, 1 時間毎に河口幅のモニターを行った (中山ら, 2006)。高さは地盤より 4 m である。また, 河口砂州地形の水際線を測定するために GPS を用いた。

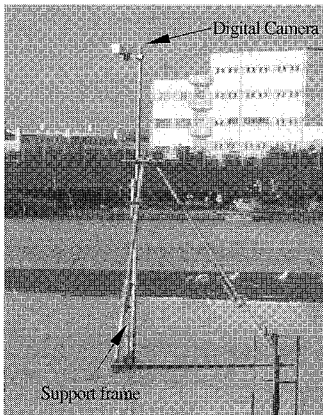


図-2 七北田川河口部に設置した画像記録装置

(4) 河口水位, 潮位および河川流量

河口より 500 m の地点に自記式水位計を設置し, 5 分ごとの水位変動を計測した。また, 河川流量は河口より 9 km の地点において宮城県により観測されている。潮位は仙台港において国土交通省により測定されている。これらのデータを入手して使用した。

4. 数値モデル

(1) モデルについて

本研究においては, Blumberg・Mellor (1987) による Estuarine Coastal Ocean Model (ECOM) を用いて, 三次元密度流の数値計算を実施した。これまで同モデルを使用して, 海洋・沿岸・河口部を対象とする様々な数値計算が行われ, 良好な結果が得られている (Blumberg ら, 1999)。同モデルにおいては, Mellor・Yamada (1982) による 2.5 レベルの乱流モデルを使用している。

後述するように, 研究対象の七北田川においては, 河口砂州の発達により河口開口部が極端に狭窄することがある。本モデルでは平面内の座標系として境界適合座標系を使用しており, 複雑な河口地形の表現が可能である。また, 水深方向には σ 座標系を使用している。

時間積分にあたっては, 外部モード・内部モードの二つに分け, 水面波伝播過程を外部モードの二次元計算により実施し, 密度差による内部波伝播過程を内部モードにより三次元的に計算を行っている (Blumberg, 1977)。

実際の数値計算においては, 感潮部地形, 風速, 上流端河川流量, 潮位, さらに開境界での水温・塩分を与え, 水位, 流速, 水温, 塩分, 乱流特性を未知数として計算を実施した。より詳細な計算方法については, Blumberg (1977), Blumberg・Mellor (1987), Blumberg ら (1999), Nguyen・Tanaka, (2006) などを参照されたい。

(2) 計算格子

数値計算に使用した平面空間格子は 160 (流下方向) $\times$ 8 (横断方向) のメッシュ数を有する。このうち, 河口部の閉塞が著しいときの河口付近のメッシュを拡大して図-3 に示した。河口地形の状況に応じて, 最下流端の地形条件を変化させて数種の計算を実施した。なお, 鉛直方向には σ 座標内で 11 に等分割している。

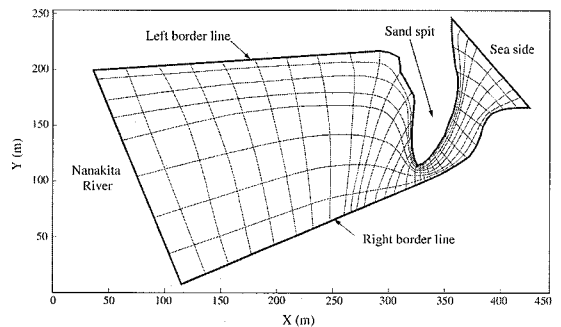


図-3 七北田川河口部の計算格子

5. 実測結果

図-4 は右岸河口砂州が伸長し, 閉塞気味であった 2005 年 8 月の地形と塩分観測結果である。観測は, 後述の図-6 の Period (A) において行われた。河口の滞筋は蛇行し, この時の塩分は最大でも 20 ppt 程度であった。

一方, 2005 年 12 月には図-5 に示すとおりに流路が直線化し, 滞筋の蛇行が見られない。後述の図-7 の Period (B) において測定された塩分変動を, 図-5 下段に示した。この時, 塩分は前述のケースに比べてはるかに

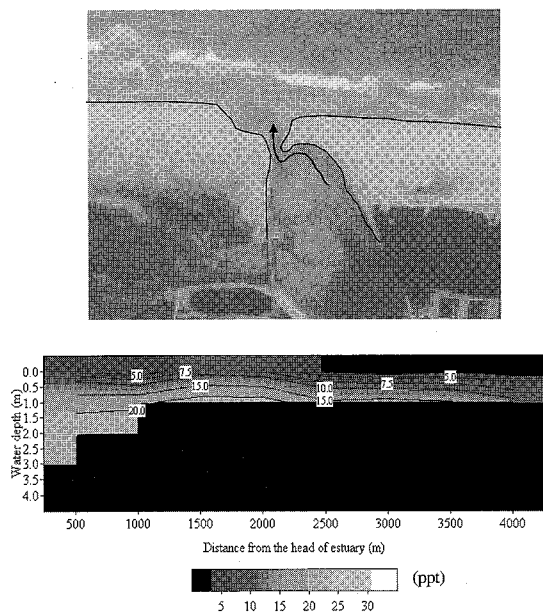


図-4 蛇行した河口地形での塩分分布
(2005年 8月 22日 11:03~11:28 に観測)

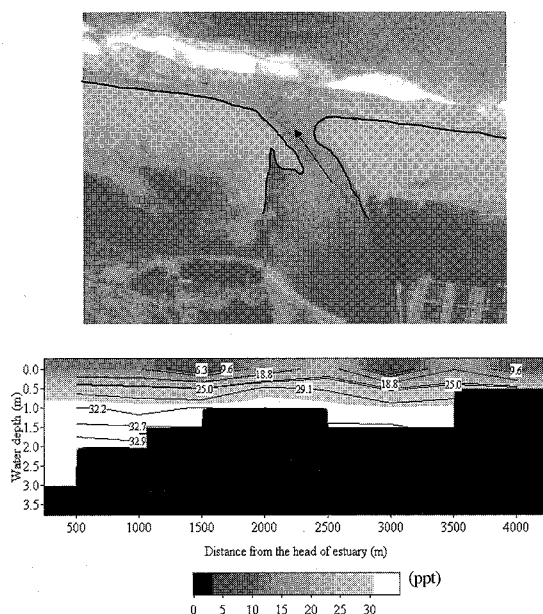


図-5 直線化した河口地形での塩分分布
(2005年 12月 22日 10:03~10:34 に観測)

に高いものになっており、特に低層で高濃度塩分を有する海水の貫入が顕著である。このように、塩分環境は河口地形の影響を強く受けていることが明らかになった。

ただし、図-6、図-7に示すように、二つの観測時には潮位変動も異なっており、これだけの観測地によって塩分に対する地形の効果を定量的に議論することには限

界がある。そこで、以下では、まず数値計算手法の検証を行った後に、河口地形やさらには波浪条件を変化させた数値計算を行い、これらが塩分に及ぼす影響を検討することとする。

6. 数値計算結果

(1) 再現計算結果

図-6 は、図-4に示した条件での三次元モデルによるシミュレーション結果である。ここで、河口水位には実測値を用いた。同図において、 Q : 河川流量、 η : 潮位または水位、 H_0 : 沖波波高、 V : 風速、 S : 塩分である。ここで、風速の正方向は河道に沿って海側から上流に向かう方向である。図-6 最下段は河口から3.0 km 上流で連続観測を行っている箇所での上層・下層の塩分変動を示している。図-6によれば、数値計算は蛇行した閉塞気味の地形時の感潮域内塩分変動を良好に再現している。

同様に、図-7は、図-5の条件下での三次元モデルによるシミュレーション結果である。先のケースと異なり、このケースにおいては日潮不等が顕著であり、また、河口部が大きく開いており、高潮時に高塩分の時間が長く続いている。数値計算はこのような塩分の変動パターンを良好に再現している。

以上により、数値シミュレーションの妥当性が確認された。そこで、次に、仮想的に河口地形および沖波波高を変化させることにより、それぞれが塩分変動に及ぼす

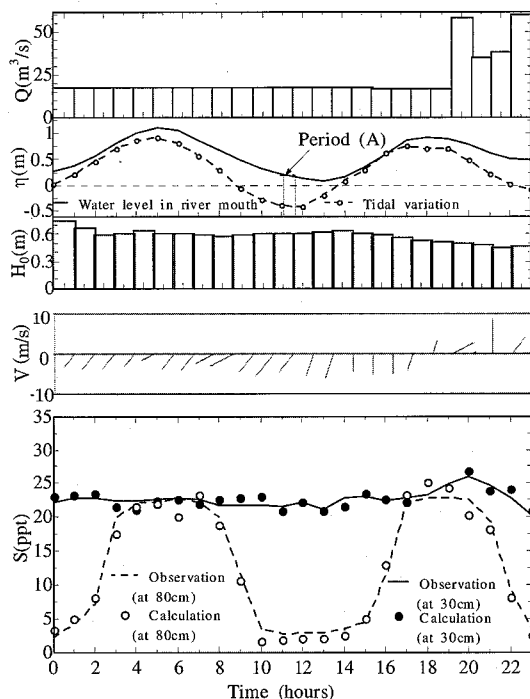


図-6 図-4の条件での数値シミュレーション結果

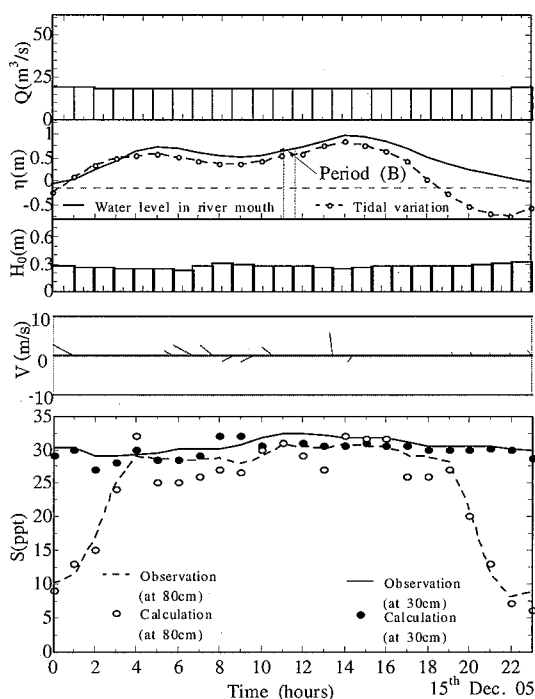


図-7 図-5 の条件での数値シミュレーション結果

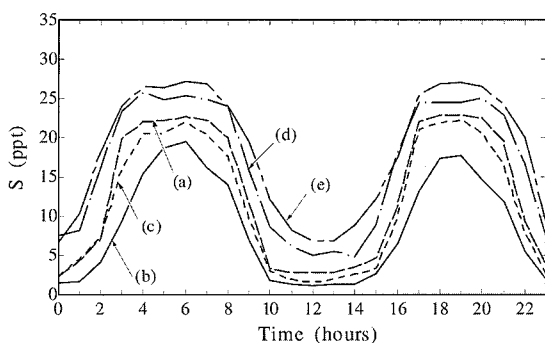


図-8 仮想的な河口幅に対する数値計算結果

影響に関する数値実験を実施する。

(2) 塩分に対する河口地形の影響

図-8 は、実測されたケース(a)とともに、4 ケースの仮想的な最狭部河口幅 B ((b): 12 m, (c): 24 m, (d): 32 m, (e): 45 m) に対する計算結果を図示したものである。測点は底面より 30 cm である。河口地形以外は図-6 に示した外力条件を入力している。明らかに、河口幅の増加とともに、塩分の増加が認められる。図-9 は一日の平均塩分であり、河口幅への依存性を示している。また、図中に示すようにほぼ線形の関係が明瞭に認められる。

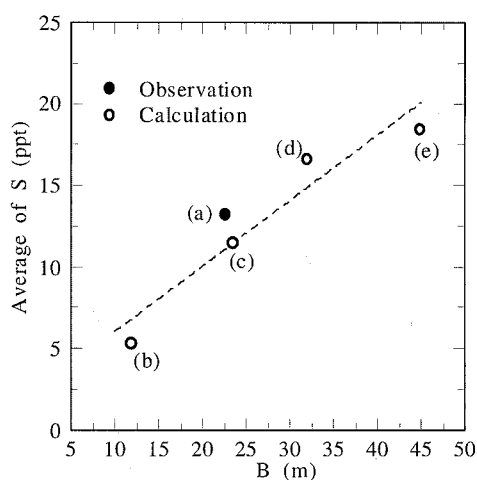


図-9 河口幅と日平均塩分との関係

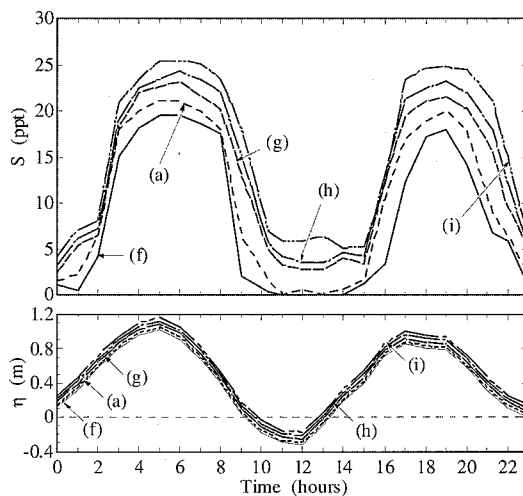


図-10 仮想的な波浪条件下で潮位と塩分の変動

(3) 塩分に対する wave set-up の影響

次に、仮想的に波高を変化させることにより wave set-up 高さが異なる条件での塩分変動に関する数値実験を実施した (図-10)。ここで、wave set-up 高さ $\Delta\eta$ の算定には、Tanaka ら (2000) が七北田川に対して経験的に定めた次式を使用した。

$$\Delta\eta = 0.0515H_0^2 - 0.0375H_0 + 0.104(\text{m}) \cdots (1)$$

ここで、沖波波高は m 単位である。ケース(a)は実測されたものであり、仮想条件としては、沖波波高を (f): 0.5 m, (g): 1.00 m, (h): 1.25 m, (i): 1.5 m の 4 つの条件を設定し、これ以外の条件は図-6 に示したケースと同一に保った。この時、wave set-up 高さは約 10 cm から 16 cm 程度である。図-10 には底面より 30 cm での塩分変動を示している。これより、波浪に起因

する水位上昇は十数センチであるにもかかわらず、波高の増加に伴う顕著な塩分上昇が確認される。

一日内の平均塩分についても、図-11 に示されるとおり波高の増加に伴う塩分の増加が見られる。

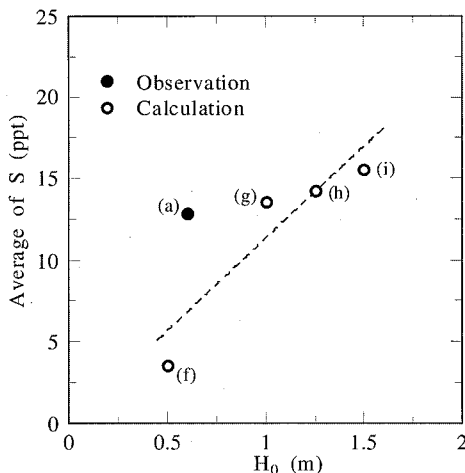


図-11 波高と日平均塩分との関係

一般に、河口部には干潟が見られることが多く、その保全に当たっては塩分変動機構の理解が重要である。本研究においては、感潮域での塩分変動を支配するファクターとして、潮汐・河川流のみならず、河口地形・wave set-up の重要性が示された。

7. おわりに

本研究においては、二級河川・七北田川を対象として、干潮区間の塩分変動に関する検討を行った。主要な結論を下記に示す。

(1)七北田川感潮域における実測により、河口地形が塩分に及ぼす影響を確認した。

(2)三次元数値シミュレーションにより、河口地形および wave set-up が塩分に及ぼす影響を定量的に評価した。我が国の河川においては、波浪や河川流の影響により激しく河口地形が変化するものが多く見られる。また、河口部の浅化した時、wave set-up が顕著に現れることも知られている。したがって、潮汐や河川流量以外の塩分変動支配要因として、河口地形・wave set-up についても考慮すべき河川が他にも多く存在するものと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省東北地方整備局塩釜港湾・空港整備事務所、宮城県仙台市土木事務所より貴重な現地データの提供を受けた。また、本研究に対して(財)河川環境管理財団の補助を得た。ここに記して、関係機関に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 上原忠保(1984)：蒲生干潟における塩分の侵入と交換に関する研究，第28回水理講演会論文集，pp. 67-73.
- 遠藤 健・田中 仁・山路弘人(2004)：河口感潮域における塩分変動に対する波浪の影響，海岸工学論文集，第51巻，pp. 886-890.
- 栗原 康(1980)：干潟は生きている，岩波新書，219p.
- 田中 仁・山本秀和(2000)：河道掘削による感潮面積増加がもたらした河口水位変動特性・底生生物層の変化，海岸工学論文集，第47巻，pp. 1136-1140.
- 中山大輔・田中 仁・山路弘人(2006)：画像記録装置を用いた河口地形変動の観測とそのモデリング，海岸工学論文集，第53巻。(印刷中)
- Blumberg, A.F.(1977)：Numerical tidal model of Chesapeake Bay, Journal of Hydraulic Division, 103, pp. 1-10.
- Blumberg, A.F. and G. L. Mellor(1987)：A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, Three Dimensional Coastal Ocean Models, by Norman S. Heaps (editor), American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 1-16.
- Blumberg, A. F., L. A. Khan and P. S. John(1999)：Three-dimensional hydrodynamic model of New York Harbor Region, Journal of Hydraulic Engineering, No.8, Vol.125, pp. 799-816.
- Hanslow, D. J., P. Nielsen and K. Hibbert(1996)：Wave setup at river entrance, Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering, pp. 2244-2257.
- Mellor, G.L. and T. Yamada(1982)：Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 20, No. 4, pp. 851-875.
- Nguyen, T.V. and H. Tanaka (2006)：Modelling hydrodynamics and salinewater transport in the Lower Mekong River, Vietnam, Tohoku Journal of Natural Disaster Science, Vol. 42, pp. 1-6.
- Nguyen, T.V., H. Tanaka, D. Nakayama and H. Yamaji(2006)：Effect of morphological changes and waves on salinity intrusion in the Nanakita River mouth, Annual Journal of Hydraulic Engineering, pp. 139-144.
- Tanaka, H. and H. Lee(2003)：Influence of jetty construction on morphology and wave set-up at a river mouth, Coastal Engineering Journal, Vol. 45, No4, pp. 659-683
- Tanaka, H., H. Nagabayashi and K. Yamauchi(2000)：Observation of wave set-up height in a river mouth, Proceedings of 27th International Conference on Coastal Engineering, pp. 3458-3471.