

河口開口位置変化の予測モデル

兜山博之*・田中 仁**・首藤伸夫***

1. はじめに

河口の地形変化に関しては、現地観測・室内実験等をもとにしてすでに多くの研究がなされてきたが、河川流、波浪等の影響を考慮した力学的なモデルによる検討が行われるようになったのは比較的最近のことである。河口開口幅に関しては、著者らの一人により予測モデルの提案がなされた(青田・首藤, 1980; 小川・藤田・首藤, 1984)。その後、本モデルは他の河川にも適用され、その有効性が確認されている(清水ら, 1985, 1988)。ただし、河口が構造物により固定されている場合を除けば、河口の開口位置は外力、おもに波の入射方向に応じて変化するので、工学上は河口の開口幅ばかりでなく、開口位置も大きな問題となることがある。

著者らは1988年より宮城県仙台市を流れる七北田川河口部で現地観測を行い、河口地形変化の特徴、河口部での水理現象等に関して報告を行ってきた(田中ら, 1990; 田中, 1991; 田中ら, 1991)。本報告では、これまでの観測結果から得られた七北田川河口地形の変形特性、特に砂州の伸長に伴う開口位置の変化について報告する。さらに、上記の河口幅予測モデルを拡張することにより河口開口位置予測モデルを構築し、それを用いた計算値と実測値との比較を行う。

2. 七北田川の河口地形変化

七北田川河口位置を図-1に示す。河口付近の左岸側には蒲生干潟がある。この干潟はもともとの河道である。すなわち、以前の河口はより北側に位置していたが、その後、仙台新港建設に伴い現在の位置に付け替えられた。仙台港は現在の河口より北側約2kmの場所に位置し、総延長約2kmの防波堤が建設されている。図-1の左図から類推されるように、卓越する波向きは南東である。このため基本的には北上する砂移動が卓越するが、防波堤建設後は反射波の影響により、河口付近の漂砂形態が複雑になっていると考えられる。

図-2に、これまでの現地観測の結果から得られた河口砂州の経年変化の概略を示した。図-2からもわかるように、七北田川の河口砂州は以下のような季節変化を示すことが判明した。

- (i) 冬季に河川流量が激減して、河口近傍に浅瀬が形成される。
- (ii) 春季から夏季にかけて、南東に卓越する波浪によって右岸砂州が伸長する。
- (iii) 秋季に台風洪水が発生すると、河口砂州のフラッシュ現象が確認できる。その後は、南東の波浪によって右岸砂州の伸長が見られる。
- (iv) 秋季後半から冬季前半にかけて河川流下流量が低減しはじめると波浪の影響が卓越して、河口砂州の先端部が上流側へ押し込まれるようになる。

このように、七北田川河口部は波浪および河川流下流量などの外力の変化に敏感で、地形変化のタイムスケールが極めて小さいことが確認された。

以下では、河口開口位置予測モデルを提案し、これにより上記の開口位置変化の予測を試みる。

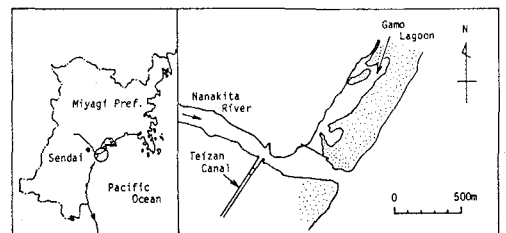


図-1 七北田川河口部

3. 河口開口位置予測モデル

3.1 河口幅変化モデル

まず、河口部の地形変化は、①河川流による土砂の排出と②波浪による沿岸漂砂の持ち込みによると考える。この考えをもとに河口部での土砂の体積保存を考慮すると、河口幅変化モデルの基礎式は次式で与えられる(小川ら, 1984)。

* 正会員 工修 佐藤工業(株) 中国支店
 ** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター

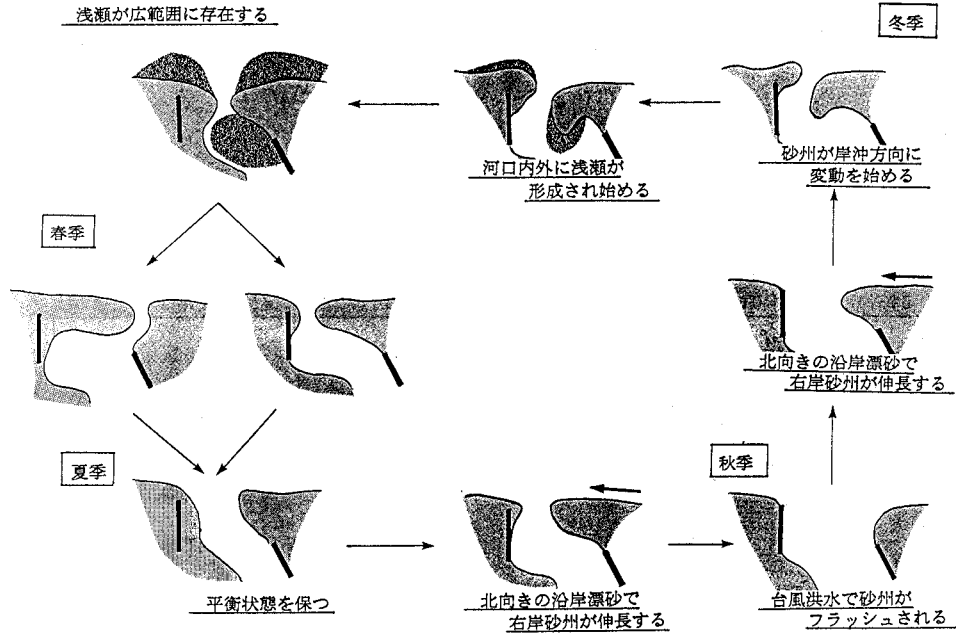


図-2 河口部汀線変化の概念図

$$(1-\lambda)Lh \frac{dB}{dt} = e_r q_r B - e_w (1-\lambda) Q_w \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B ：川幅、 λ ：砂の空隙率、 L ：砂州幅、 h ：河口水深、 q_r ：河川流による掃流砂量、 Q_w ：沿岸漂砂量、 e_r ：流れによる土砂排除作用の効率、 e_w ：波浪による沿岸漂砂持込みの効率である。上記モデルでは、右辺第1項が河川流による砂の排出を、左辺第2項が波浪による沿岸漂砂の持込みをそれぞれ示している。式(1)中の掃流砂量式 q_r および沿岸漂砂量式 Q_w はそれぞれ以下に示すものを用いた。

掃流砂量式 q_r は Kalinske-Brown 型の掃流砂量式を用いた。

$$q_r = 10\psi(\psi - \psi_c)u_* d_{50} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ψ ：シールズ数、 ψ_c ：移動限界シールズ数、 u_* ：摩擦速度、 d_{50} ：土砂の平均粒径をそれぞれ示す。

沿岸漂砂量 Q_w は Savage 型の式を用いた。

$$Q_w = \alpha E_b C_{\theta b} \sin \theta_b \cos \theta_b \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α ：沿岸漂砂量係数、 E ：波浪エネルギー、 C_{θ} ：群速度、 θ ：波の入射角をそれぞれ表す。また、添え字 b は碎波点での諸量であることを示す。沿岸漂砂量係数 α は $\alpha = 0.05$ とした(田中, 1991)。Savage 型の沿岸漂砂量式は土砂の空隙分も含まれているので、土砂の実質体積だけを算定するために式(1)右辺で $(1-\lambda)$ を乗じた。

式(1)で示されるモデルを用いて1990年の河口幅変化のシミュレーションを行った結果を図-3に示す。

図-3において実線は計算値を、○印は実測値をそれぞれ示す。なお、このモデルは河口砂州のフラッシュ現象を再現しきれないので、フラッシュ現象が起きた時点で計算を中断し、フラッシュ後の実測値を計算初期値として計算を再開している。また、この計算で用いた排除効率 e_r および流入効率 e_w は、計算値と実測値との差の2乗平均が最小となるように選んだ最適値である。その結果、流れによる土砂の排除効率として $e_r = 0.48$ 、波浪による土砂の流入効率として $e_w = 1.00$ という最適値が得られた。すなわち、七北田川においては流れによって生じる掃流砂の約半分と波浪によって生じる沿岸漂砂の全てが、河口部地形変化に寄与しているという結果になった。前節で示したように、七北田川河口部が外力の影響に敏感であることを考慮すれば、良好な結果が得られたと考えられる。

3.2 河口開口位置予測モデル

第2節に示した観測結果をもとに、たとえば右岸方向から来襲する波浪は右岸砂州の伸長に寄与するものと考えられる。そこで、河口開口位置変化モデルは右岸砂州および左岸砂州それぞれに対して別々に土砂体積の保存則を考えると次式のようなになる。

$$\text{右岸: } (1-\lambda)Lh \frac{dX_R}{dt} = e_r q_r (1-f)B - e_w (1-\lambda)Q_R \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{左岸: } (1-\lambda)Lh \frac{dX_L}{dt} = -e_r q_r f B + e_w (1-\lambda)Q_L \dots\dots\dots (5)$$

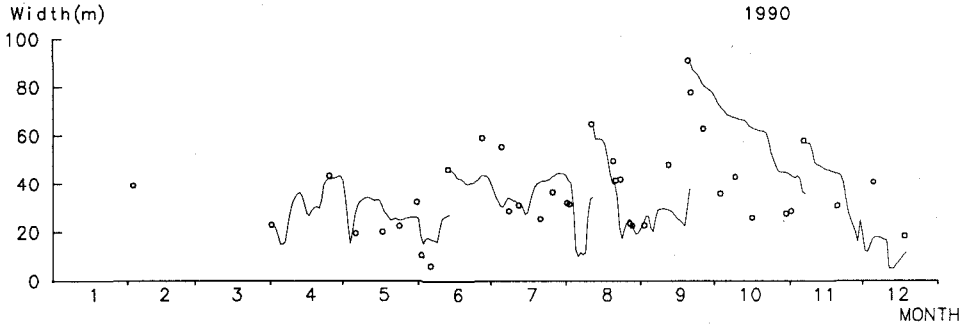


図-3 河口幅の計算結果と実測値の比較

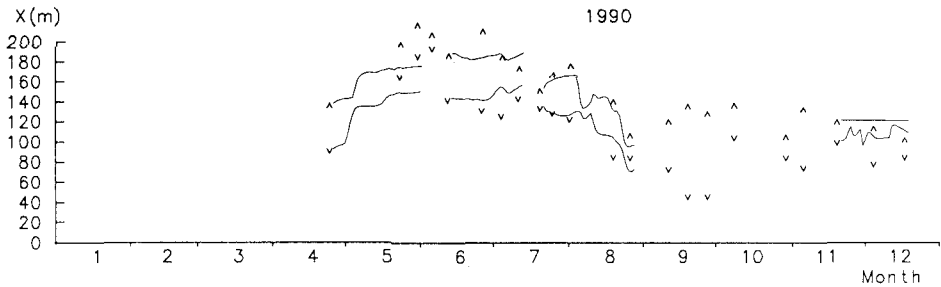


図-5 計算による開口位置と実測値との比較

ここで、 X_R, X_L は右岸砂州先端及び左岸砂州先端の汀線方向の座標である。また、沿岸漂砂 Q_R, Q_L は波浪の来襲方向によって以下のように計算される (図-4 参照)。

$$\theta > 0 \text{ とき, } Q_R = Q_w, Q_L = 0 \dots\dots\dots (6a)$$

$$\theta < 0 \text{ のとき, } Q_R = 0, Q_L = Q_w \dots\dots\dots (6b)$$

さらに、 f は振り分け係数であり、排出される掃流砂中の左岸砂州への寄与分を示す。

式 (4) から式 (5) を減じ、 $X_R - X_L = B$ であることを考慮すれば、河口幅変化モデルの式 (1) に帰着することがわかる。そこで、河口開口位置変化モデルの適用に際しては、まず、式 (1) を用いて河口幅の計算を行い、 e_r, e_w を同定する。つぎに、この係数を用いて式 (4) および (5) を解き、開口位置の経時変化を予測する。

計算結果と実測との比較を図-5 に示した。図中で Δ 印は右岸砂州先端の、また、 ∇ 印は左岸砂州先端の実測値、実線は計算値を表わす。最適振り分け係数 f の値は各計算期間内で計算値と実測値の差の 2 乗平均が最小となるものを選んだ。5 月～6 月の開口位置の南下、8 月～9 月の河口位置の北上を再現することができた。しかし、11 月後半以降の冬季の計算の精度は十分ではなく、今後の課題となった。

また、振り分け係数 f の物理的な意味が明らかにならず、ある与えられた条件下でいかに f を与えたらよいかの問題となる。そこで、次節では振り分け係数 f

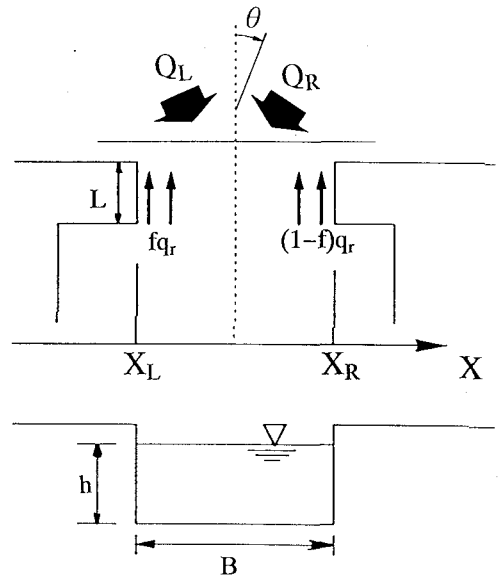


図-4 開口位置モデルの説明図

に対する検討を行う。

3.3 振り分け係数 f の検討

振り分け係数 f に大きく関与すると考えられる河川流下流量 (河川流量と潮汐流量の合計) Q と河口中心位置 X_c の関係を求めたものが図-6 である。図-6 において、

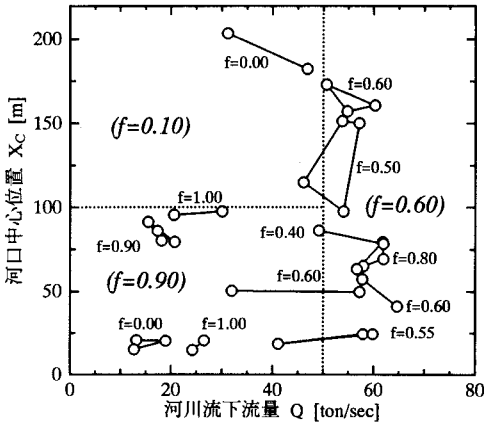


図-6 振り分け関数 f と河川流下流量・河口中心位置との関係

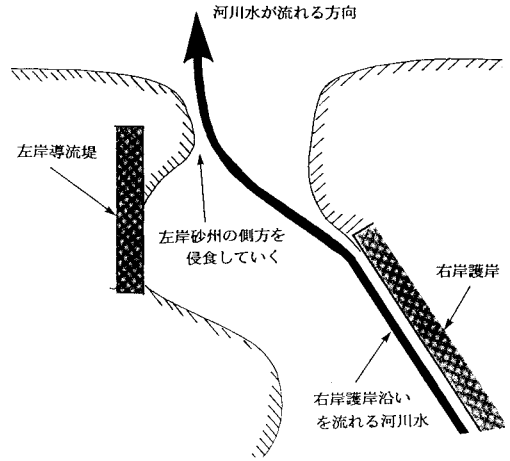


図-7 河口部土砂流送過程の模式図

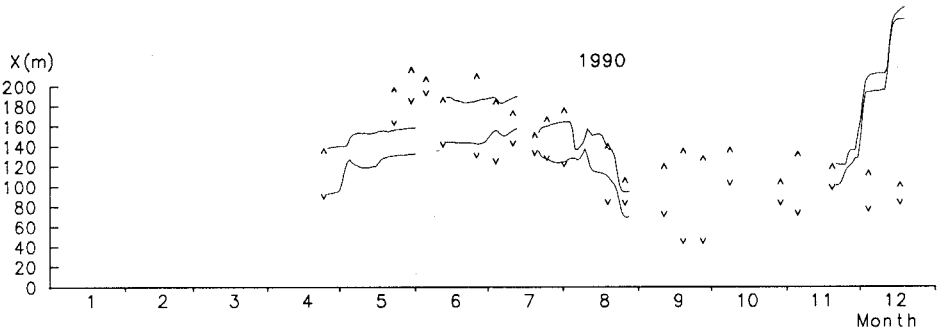


図-8 振り分け関数 f を考慮したときの開口位置の計算結果

実線で結ばれた印は1989年から1992年までの各計算期間内での諸量で、その近傍の振り分け係数 f の値が各計算期間内での計算値と実測値との差の2乗平均を最小にする値である。河口中心位置 X_c は左岸に原点をおいて定義しており、河口付近の河道が蛇行していないときには、 $X_c=80$ m 付近が河口中心位置に対応する。図-6 からわかるように河川流下流量 Q が 50 ton/sec 程度以上であれば、河口中心位置 X_c に関わらず振り分け係数 f は 0.6 程度の値を示す。また、河川流下流量 Q が 50 ton/sec 以下になると、大まかではあるが、河口中心位置 X_c の値が小さいとき（ここでは、河口中心位置が左岸寄りに位置するとき）は振り分け係数 f の値が大きくなり、逆に X_c の値が大きいときには f の値は小さくなるという傾向がみられる。

河川流下流量 Q が 50 ton/sec 程度以上のときには河道が直線的に伸びていることが多く、この場合、流れによる土砂の排除作用は両岸砂州で同程度であることが期待される。従って、河川流下流量が 50 ton/sec 程度以上のときに振り分け係数 f が 0.5~0.6 程度の値を示すこ

とは合理的であると考えられる。ただし、左岸砂州の流出土砂の比率が右岸のそれと比較して1割ほど大きな値になっている。これは七北田川河口部の人工護岸の影響であることが考えられる。河川流は河口砂州に到達する直前まで右岸の護岸沿いを流下してくる。この護岸は左岸方向へ斜めに建造されているので、河川流はやがて右岸からそれて左岸に達し、左岸砂州の側方を侵食する。そのために、左岸砂州の流出土砂の比率が右岸砂州のそれと比較して大きくなるものと考えられる（図-7 参照）。

また、河川流下流量が 50 ton/sec 程度以下になると、冬季の河口部地形に代表されるように、河口砂州の先端が河口内に押し込まれるような形状を呈するようになり、沿岸方向だけでなく岸沖方向での河口砂州の変動も見られるようになる。このモデルでは沿岸方向での河口砂州の変動は説明できるが、このように岸沖方向に砂州の変動がみられるものについては説明しきれない。そのため、振り分け係数 f に明確な傾向が確認されないものと考えられる。

以上の振り分け係数 f に対する検討から、河川流下流量 Q と河口中心位置 X_0 の値によって、計算の1ステップ毎に図-6の()内に示した振り分け係数 f の値を用いて計算を行った。その結果を図-8に示した。図-5と比較すると、冬季の精度は落ちているが、河川流下流量が50 ton/sec程度以上を保つ夏季の計算結果は河口開口位置変化の傾向をよく説明している。

4. おわりに

本報告では、二級河川である七北田川における河口地形変化、特に開口位置の変化機構に関する検討を行った。その結果、開口位置は、来襲する波浪エネルギーと密接に関係していることがわかった。この成果をもとに、河口開口位置を予測するモデルを提案した。本モデルは従来の河口幅予測モデルを变形して、左岸・右岸に対して別々に保存則を立てた形になっている。計算の結果、開口位置が極端に変化する場合には、比較的良好な結果が得られた。ただし、改良の余地もある。特に、振り分け係数 f についてはばらつきが大きいので、今後、より詳細な検討を行う予定である。

謝辞：本研究を行うに際し、東北大学工学部・澤本正

樹教授、日本テトラポッド応用水理研究所・佐藤勝弘氏より有益な御教示を頂いた。また、東北大学河川研究室、津波研究室の諸兄には現地調査に際して熱心な協力を頂いた。運輸省塩釜港工事事務所および宮城県仙台台東土木事務所からは貴重なデータの提供を受けた。さらに、本論文の公表に際しては小川基金の補助を受けた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 青田茂雄・首藤伸夫 (1980): 河口断面積変化過程の数値モデル, 第24回水理講演会論文集, pp. 203-208.
- 小川由信・藤田義治・首藤伸夫 (1984): 河口断面・河口地形の変化について, 第28回水理講演会論文集, pp. 129-135.
- 清水琢三・横山博実・近藤浩右・錦木 宏・松原良夫 (1985): 締切堤建設に伴う鮫川河口周辺の地形変化, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 395-399.
- 清水琢三・近藤浩右・木村祝啓・池田 正・坂井 淳 (1988): 感潮狭水路を有する漁港の航路水深維持, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 377-381.
- 田中 仁・伊藤俊夫・首藤伸夫 (1990): 七北田川における河口地形変化と水理特性, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 334-338.
- 田中 仁・伊藤秋彦・首藤伸夫 (1991): 七北田川河口における現地観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 361-365.
- 田中 仁 (1991): 七北田川の河口閉塞と河口砂州フラッシュ, 水工学論文集, 第35巻, pp. 275-280.