

河口最狭部断面形状の推定法について

高 橋 淳*・田 中 仁**

1. はじめに

砂浜海岸に注ぐ河川の河口開口部は海浜からの土砂の流入により埋塞しやすい。特に、中小河川においては河口部の砂を排出する能力が相対的に小さいため、閉塞問題がより深刻である。

さて、中小河川において河口部が狭窄しているとき、河口内水位変化の様子は潮位変動と大きく異なることがある。このような河口水位波形は、最狭断面積の大小に応じたエネルギーの損失を反映したものになっている。すなわち、河口内水位の変動特性には河口断面形状に関連する情報が含まれているということが出来る。そこで、著者の一人はこの特性を逆に利用し、実測された河口内水位データから河口断面形状を推定する手法を提案した(伊藤・田中, 1994; 田中, 1995)。その際に解析対象としたのは、著者らにより比較的豊富な現地データが蓄積されている二級河川・七北田川(仙台市)のみであり、その他の河川への適用は現在までのところ全く試みられていない。また、河口断面が十分に維持されているときには、最狭部でのエネルギー損失が微小であるため、上記の河口内水位と潮位変動との相違が現れないものと考えられる。このことから、著者らにより提案された河口断面形状推定法には適用限界が存在するものと予想される。

そこで、本研究では河口断面形状推定法を七北田川以外のいくつかの河川へも適用することにより、手法の有効性の検討を行った。また、断面推定を行う際に必要な各種資料が豊富でない場合の問題点を明らかにした。さらに、本推定法の適用限界を無次元パラメータで表示することを試みた。

2. 断面推定方法

2.1 基礎式と計算手法

断面推定手法の詳細はすでに報告済み(伊藤・田中, 1994; 田中, 1995)であるので、ここでは概要のみを示す。実際の河口水路は複雑な地形となっているが、こ

では図-1に示すような理想化された inlet-bay system として扱う。この時、基礎式としては式(1)の一次元方程式を用いることが出来る。

$$\frac{d^2 \eta_B}{dt^2} + \left[\left(\frac{K_{en} + K_{ex}}{2L_c} + \frac{g n^2}{R^{4/3}} \right) \frac{A_B}{A_c} \frac{d\eta_B}{dt} - \frac{Q_B}{A_B} \right] - \frac{B}{A_c} \frac{d\eta_B}{dt} \left[\left(\frac{d\eta_B}{dt} - \frac{Q_B}{A_B} \right) + \frac{g A_c}{L_c A_B} (\eta_B - \eta_0) \right] = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η_B : 河口内水位、 η_0 : 潮位、 K_{en}, K_{ex} : 入口、出口の損失係数、 L_c : 感潮狭水路の長さ、 g : 重力加速度、 n : Manning の粗度係数、 A_B : 感潮面積、 Q : 感潮域に流入する河川流量、 R : 径深、 A_c : 狭水路断面積、 B : 水路幅である。推定する断面形状は矩形、放物形あるいは三角形で代表させる。ここで、水路内の水位 η の時間変化に伴い R, A_c, B は変化する。これらは、図-2に示すように仮定された断面形状、水路の水位 η 、基準水位での水路幅 b および最大水深 h_c から解析的に求められる。また、計算の際、wave set-up による河口部の平均水位の上昇を考慮して、これを潮位 η_0 に加算する。その計算法の詳細は後述する。

計算方法は、まず b, h_c を適当に仮定し、潮位 η_0 に set-

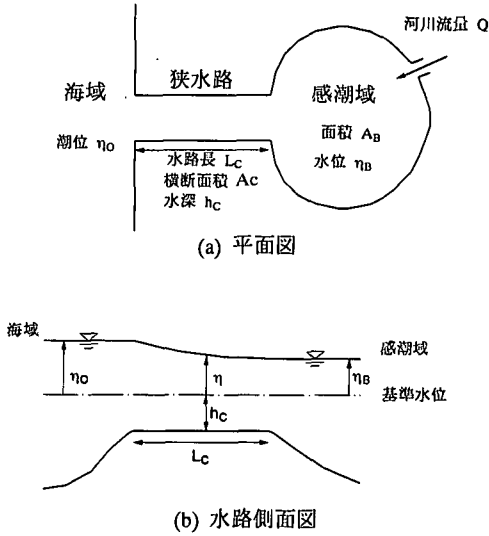


図-1 感潮水路の模式図

* 正会員 工修 新潟県 六日町土木事務所
** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

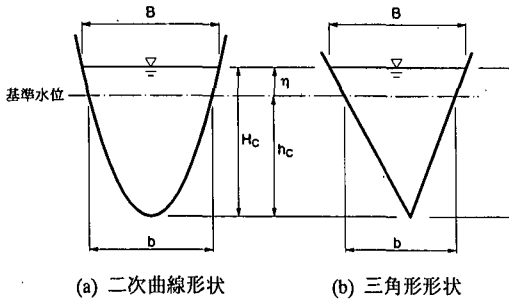


図-2 断面形のモデル化

up 高さを加えたものを外力として与え、式 (1) を Runge-Kutta-Gill 法で数値的に解く。次に、これにより得られる河口内水位の計算値 η_{Bcal} と実測水位 η_{Bmeas} との誤差の計算期間内の平均値を求める。この平均誤差が最小となる b, hc の組み合わせを探し求めることにより、断面形状の推定値が得られる。

2.2 推定法の問題点

上記の手法を実河川に用いる際には、いくつかの問題点がある。これらは、(1) 上記のモデル化における簡素化された河口地形と実際の複雑な地形との差違に起因するもの、(2) 一般的に現地資料が十分でないために物理量の設定が精度良く行えないことによるものの二つに大別される。

前者に分類される問題点として、水路長の評価が挙げられる。すなわち、モデルでは一様断面水路としているのに対し、現実には最狭部を挟んで断面の変化が見られる。このため、Mehta and Ozsoy (1978) は理想的な狭水路の全損失水頭を実際の水路の全損失水頭に一致させることにより、等価水路長を求めている。ただし、この手法を用いるためには河口部水路に沿って詳細な横断測量データが必要であり、一般に測量資料が十分には存在しない中小河川においては、その評価は困難であろう。

また、式 (1) を解く際には、海側水位としての河口部の wave set-up を加味している。これは、河口近傍の水深が浅いときは、高波浪時に河口前面で碎波が生じることがあり、wave set-up 効果を見逃すことができないためである (高橋・田中, 1995)。しかし、河口内の set-up 高さの推定法は確立されていない。これは、第

二の問題点に分類される。

本手法を用いる際、式 (1) 中の径深 R 、断面積 A_c および水路幅 B の算定に使用する水位 η の与え方も明らかではない。さらに、断面推定に当たっては、事前に形状を三角形、放物断面あるいは矩形のいずれかに仮定する必要があるが、その際いずれの形状を用いるべきかの指針は明らかでない。そこで、以下ではこれらの問題について検討を行う。

3. 対象水域

対象水域は、福島県・鮫川 (二級河川)、宮城県・七北田川 (二級河川)、同・名取川 (一級河川)、同・長面浦 (ラグーン) である (図-3)。これらは、河川規模、河川流量の多寡、導流堤の有無、感潮狭水路の長さに大きな相違があるので、上記の四つの問題点について総合的な検討を行うことができる。

各水域の特徴ならびに各水域を対象とした計算における検討内容を示す。

a) 鮫川: 福島県・いわき市を流れる二級河川である。河口地形に関する検討はすでに、Ogawa et al. (1984), Shimizu et al. (1986) によりなされている。河口左岸は締め切り堤により固定されている。解析には、水位測定、断面測量などが行われた 1986 年 3 月 27 日の

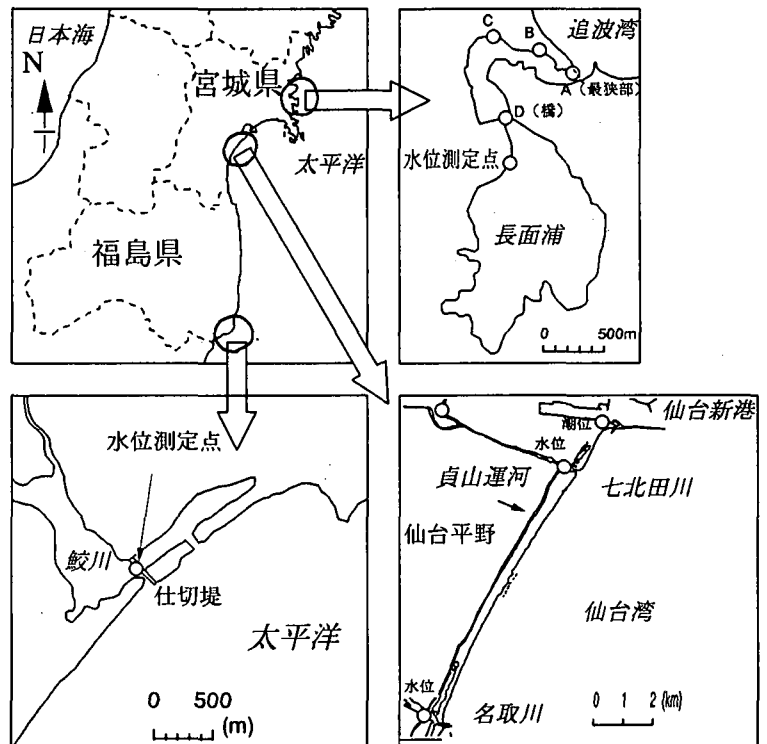


図-3 断面推定手法を適用した各水域の概要

もの(常磐共同火力株式会社, 1986)を用いた。断面形は放物形と三角形の二通りを仮定した。河口部の wave set-up 高さについては、まず合田(1975)のモデルを用いて海岸部の wave set-up 高さを計算し、これに定数を掛けて減じ、誤差 Error が最小となる定数を用いた場合の結果を用いた。実水路長は約 250 m であるが、計算の際には他に 150 m, 200 m の値も用いて結果を比較した。

b) 七北田川: 同河川も二級河川であり、著者らにより河口地形、河口水位、潮位、流量、波浪データ等の現地データが蓄積されている(田中, 1995)。ここでは、横断測量データが整っている 23 ケースを対象にして断面推定を行った。左岸には汀線まで伸びる導流堤が存在するが、河口内に土砂が堆積しやすく、水路の流路が導流堤から離れる場合も少なくない。このため、断面形についてはいずれのケースでも放物形と三角形の二通りを仮定した。河口部の wave set-up 高さについては、同河川で観測された河口内の wave set-up 高さのデータ(高橋・田中, 1995)の回帰式を求め、これを用いて波浪データから推定した。水路長は 23 ケースいずれにおいても 61 m に統一した(伊藤・田中, 1994)

c) 名取川: 同河川は本研究で対象とする河川の中で唯一、一級河川であり、河川規模が他に比べて大きい。河口は右岸導流堤と中導流堤により固定されている。名取川の河口維持に関わる問題点について、宇多(1995)により報告がなされている。導流堤の影響で、実際の断面形は矩形に近いが、他に放物形や三角形と仮定した計算も実施した。河口部の水深が 8 m 程度確保されているために、通常は河口前面で碎波が生じることはないので、計算においては wave set-up は考慮していない。実水路長は 550 m であり、計算にはこの値を用いた。

d) 長面浦: 長面浦は追波湾に注ぐ北上川の右岸に位置するラグーンである。流入する河川は無く、潮汐流量のみによって開口部が維持されている。この点が他の水域との大きな相違点である。河口部は湾曲しているため、ここでは断面形を三角形と仮定した。また、波浪データが無いために、波浪諸元から wave set-up 高さを推定することができない。そのため、0.1 m 単位で wave set-up 高さを仮定した。実水路長は 1700 m と長い。計算には他に 300 m, 850 m も用いて結果を比較した。

4. 断面推定手法の適用結果

4.1 仮定された断面形の影響

鯉川、七北田川および名取川で断面形を変えて推定したが、各水域ともに断面形の仮定を変えても推定される断面積にはほとんど違いがなかった。例えば、七北田川の計算結果を示せば図-4 のようである。従って、狭水路断面積を推定する場合には、現地での河口断面形に関す

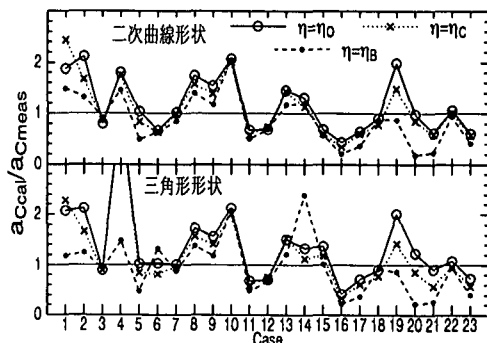


図-4 七北田川の計算結果

る情報が十分ではなくても、得られる結果に大きな影響を及ぼすことはない。

4.2 wave set-up 高さの影響

鯉川河口内の wave set-up 高さは合田モデルによる海浜汀線での値の約 4 割とした場合に水位計算誤差が最小となった。また長面浦では河口内の wave set-up 高さを 0.1~0.2 m とした場合に良い結果が得られた。いずれも、七北田川でのデータ(高橋・田中, 1995)と比べてオーダー的には不自然なものではない。このように、wave set-up 高さが未知の場合には、これを未知数として同定すればよいであろう。

4.3 水路長の影響

鯉川および長面浦で水路長を変化させて推定した。水路長が長いほど推定断面積も大きくなる結果となったが、水路長はほぼ実際のものを用いた場合に断面積が良く推定されていた。鯉川の計算結果を図-5 に示す。七北田川では水路長を統一したが、水路長よりも大きな河川流量や実断面形状などの他の因子が推定結果に与える影響が大きい。

4.4 水路内水位 η の影響

各水域での計算の際、水路の水位 η は潮位 η_0 、河口内水位 η_B およびその平均値 $(\eta_0 + \eta_B)/2$ の 3 通りを仮定した。その結果、 η としては潮位と河口内水位の平均値を用いた場合に良い結果を得ることが出来た。各水域の断面形について推定値と実測値を図-6 に示した。

名取川を除いて良好な結果が得られている。図-6(c)

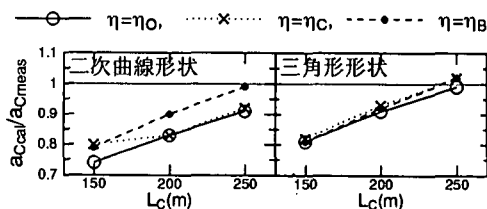


図-5 鯉川の計算結果

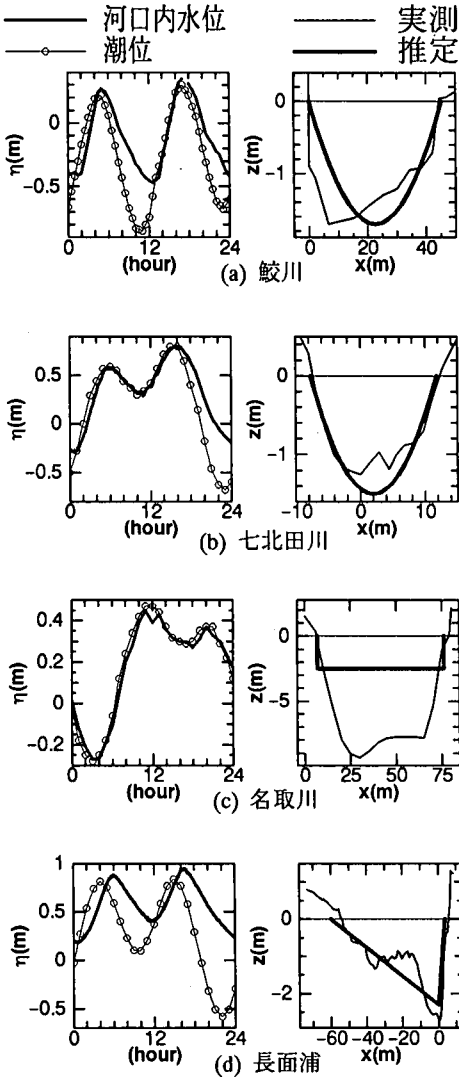


図-6 水位波形と断面形状

に見られるように名取川河口内水位は潮位とほぼ等しい。このように狭窄部でのエネルギー損失が顕著でないケースには本手法を適用できない。

5. 断面推定手法の適用限界

本手法は、河口内水位と潮位との違いを手がかりに断面を求めるものであり、振幅減衰率 $\bar{a}_B = (\text{河口内水位振幅}) / (\text{潮位振幅})$ が1に近いときには使用できない。そこで、ここでは断面推定手法の可否を判定するための方法について検討を行う。

一般に先に示した振幅減衰率 $\bar{a}_B$ を求めるためには、式(1)の数値積分が必要であるが、単純化された条件下では解析解が得られる。現在までいくつかの解が得られているが、ここでは、Mehta and Ozsoy (1978) によるものを用いる。

まず、河川流量は潮汐によるそれに比べ小さいものとして無視する。さらに、潮汐の振幅が狭水路の水深より非常に小さいと仮定し、また摩擦項をフーリエ級数をもとに表現することにより、基礎式(1)を線形方程式に変形することが出来る。このとき、振幅減衰率 $\bar{a}_B$ の解析解が次式で与えられる。

$$\bar{a}_B = \left\{ \frac{[(1-a^2)^4 + \mu^2]^{1/2} - (1-a^2)^2}{\frac{1}{2}\mu^2} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$a = \left(\frac{L_c}{g} \frac{A_B}{A_c} \right)^{1/2} \sigma \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta = \frac{F}{2L_c} \frac{A_B}{A_c} a_0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu = \frac{16}{3\pi} \beta a^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$F = K_{en} + K_{ex} + \frac{2L_c g n^2}{h^{4/3}} \dots\dots\dots (6)$$

であり、 a は無次元化された潮位の振動数、 β は無次元化された狭窄部抵抗係数であり、また、 σ : 潮汐の振動数、 a_0 : 潮位振幅である。

式(2)による結果を図-7に実線で示した。また、本研究で対象とした四つの水域について α, β を計算し、同図に丸印で示した。現在のところ、推定を試みた水域の数が十分に豊富ではないため、明確な境界を引くことは困難であるが、これらのうち少なくとも鮫川まではこの手法が適用できることを考慮して、ここでは適用条件として次式を提案する。

$$\beta \geq 0.41\alpha^{-2} \dots\dots\dots (7)$$

β が大きいほど狭窄部でのエネルギー損失が大きい。このため、河口内水位の低減が著しくなり、本推定手法の適用性が高くなる。干潮狭窄部の諸元が与えられたときには、この条件により本手法の適用が判定できる。

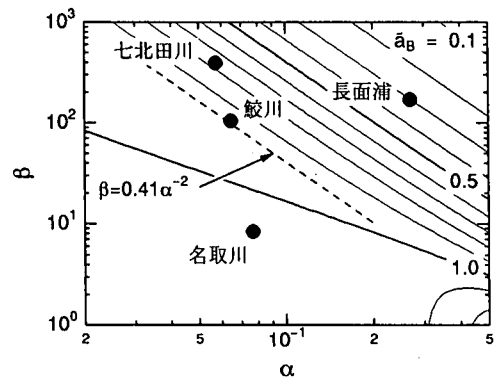


図-7 断面推定手法の適用判定図

6. ま と め

本研究では、水位データから河口断面形状を推定する手法について、その有効性を検討した。河口横断測量に比べ、河口内水位観測は容易にかつ安価に行うことができる。本研究の手法によれば、水位データから最狭断面の情報を推定することができる。これにより、従来、データの収集がきわめて手薄であった中小河川の河口断面特性に関して、きわめて有益な情報を提供できることになる。

本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

(1) すでに提案した河口断面形状推定法において、問題となった四つの項目について、その対処方法が明らかになった。

(2) 本研究の対象とした四つの河川のうちの一つでは、同手法による推定断面が得られなかった。これは、河積が十分維持され、潮位と河口内水位に差が見られず、断面形状を推定するための「手がかり」が河口内水位波形に現れていないためである。

(3) 線形理論から得られる二つのパラメータ α, β を用いて、この推定手法適用の可否を判断するための条件式が得られた。

謝辞：本研究を行うに際して、建設省仙台工事事務所、運輸省塩釜港工事事務所、宮城県仙台東土木事務所、同七北田ダム管理事務所からは貴重な現地観測データを提

供して頂いた。また、現地観測に際して、東北大学大学院・山内健二君を始めとする多くの諸君から熱心な助力を得た。さらに、本研究に対して、文部省科学研究費補助金(総合研究(A)、代表：東北大学 澤本正樹教授、試験研究(B)、代表：田中 仁)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

- 伊藤健人・田中 仁 (1994): 河口内水位データを用いた河口断面形状の推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 461-465.
- 宇多高明・松田英明 (1995): 導流堤方式の河口処理の現状と問題点, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 556-560.
- 常磐共同火力株式会社 (1986): 昭和60年度勿来発電所周辺海浜調査報告書, 179 p.
- 高橋 淳・田中 仁 (1995): 河口内で観測された wave set-up 高さ, 第50回土木学会年講概要集, 第2部(B), pp. 844-845.
- 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. 169-181.
- 山本晃一 (1978): 河口処理論 [I]—主に河口砂州を持つ河川の場合—, 土木研究所資料, 第1394号, 223 p.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- Mehta, A. J. and Ozsoy, E. (1978): Inlet Hydraulics, in Stability of tidal inlets, ed. Bruun, P., Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 83-108.
- Ogawa, Y., Fujita, Y. and Shuto, N. (1984): Change in the cross-sectional area and topography at river mouth, Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, pp. 233-247.
- Shimizu, T., Kondo, K. and Kajima, R. (1986): Reduction process of cross-sectional area at river mouth, Proc. 20th Int. Conf. Coast. Eng., pp. 1535-1549.