

波と流れを考えた河口部の平衡断面

Stable Sectional Area of A River Mouth Balanced by Flow and Wave Action

宇都宮大学工学部 正 員 ○田 中 仁
宇都宮大学工学部 正 員 須 賀 堯三

1. はじめに

河口部の砂移動運動は極めて複雑な非線形現象であり、主たる要因としては、河川流・潮汐・入射波浪・密度流効果等が挙げられる。通常は、これらの外力に従って河口の分類を行い、それぞれに対して河口断面積等の諸特性に関する検討がなされて来た。例えば、河川固有流量あるいはタイダル・プリズムと河口断面積との関連を調べた研究が数多く存在する。しかし、現実の河川は、いずれかのパターンに明確に分類されるものは少なく、むしろ、いくつかの効果が重合する場合が多い。

本研究では、まず実験データをもとに、定常流と波が共存する河口モデルにおける平衡断面積について検討を行なった。さらに、現地資料を用いた解析も行い、潮汐流が共存する場での河口断面特性についても調べた。また、これらの成果をもとに、河川流による流砂量・波浪による漂砂量の定式化を試み、簡単な河口変形モデルにより、その妥当性を検証する。

2. 河口平衡断面積について

(1) 考 察

海浜における二次元的形状は、通常、図 1(a)の様に分類される。その判別条件は、沿岸砂州の発生の有無、砂線の前進・後退等、研究者により異なるが、本質的には、波による岸沖漂砂の卓越移動方向の相違が、図 1(a)の地形形状に現われると考えて良い。一方、河口模型実験においても、図 1(b)に示す様に、図 1(a)と同様な縦断形状が観察されている^{1),2),3),4)}。

図 1 に示す地形分類を行う目的は、ある水理条件、初期地形を与えた時の最終形状を予測することにある。以下では、図 1(b)の河口形状と平衡断面形状との関連性について考察を行う。

図 1(b)において、タイプⅠとタイプⅡの境界では、河口部に侵食も堆積も生じない。この時、河川流出土砂 Q_B と海から持ち込まれる砂 Q_B とがバランスしていると考えられる。

次に、大出水等により拡幅した後の河口に一定流量が流れる極端な非平衡状態を考える。(本研究では、沖波波形勾配は比較的小さいと考え、波動成分が岸向き漂砂を生ぜしめる場合のみを考える。波動成分が沖向き砂移動を生起させる場合は、重畳された河川流は沖向き砂移動を助長するので、河口閉塞の観点から見れば、安全側である。) この時、海からの漂砂が卓越するので、当初はタイプⅢに属するであろう。時間の経過に従って断面が縮小し、徐々に河川流の掃流力が増す。最終的には Q_B と Q_B がつりあうまで、断面縮小が続く。一方、逆に過小な流水断面積に過大な流量が流れる時には、逆のプロセスを経て、平衡状態に至る。

以上により、河口における非平衡状態から平衡状態への遷移過程は、河口自身が断面積変化により自ら断

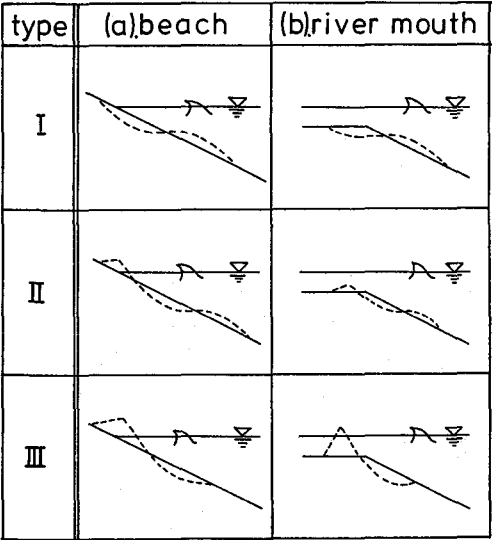


図 1 海浜縦断形状、河口縦断形状

面平均流速を調節して、タイプⅠ、タイプⅡの境界に移行して行く過程であると考えられる。

以下では、この仮定のもとに、河口平衡断面に関する検討を行う。

(2) 室内実験データの解析

図1(a)に示した二次元海浜形状については、堀川・砂村・近藤・岡田⁵⁾によって調べられており、次式が得られている。

室内実験データ：

$$\begin{cases} 10 \leq C & \text{ならばタイプⅠ} \cdots \cdots (1a) \\ 3 \leq C \leq 10 & \text{ならばタイプⅡ} \cdots \cdots (1b) \\ C \leq 3 & \text{ならばタイプⅢ} \cdots \cdots (1c) \end{cases}$$

現地データ：

$$18 \leq C \quad \text{ならばタイプⅠ} \cdots \cdots (2)$$

ここに、

$$C = \frac{H_0/L_0}{(\tau/\beta)^{-0.27} (d/L_0)^{0.67}} \cdots \cdots (3)$$

であり、また、 H_0 ：沖波波高、 L_0 ：沖波波長、 $\tan\beta$ ：初期勾配、 d ：底質粒径である。前節での考察より、実験水路においては、 C が10より小さい程、岸向きの漂砂量が卓越することを表わしている。従って、平衡状態での砂移動現象において、波浪に起因する砂移動を記述する無次元量として C を選ぶことができよう。前節の考察および式(1)より、波浪成分が弱い時の平衡条件は $C \approx 10$ となることが予想され、以下では河川流のある場へ式(1)を拡張すれば良い。一方、河川流の土砂輸送力を表わす指標としては無次元掃流力 τ_* が挙げられる。

山本⁶⁾の河口平衡断面に関する実験結果を式(3)の C と τ_* でまとめた結果が図2である。図中の記号は、河幅 B と最深部深 h_c の比を表わしている。データのばらつきが非常に大きい、特に B/h_c が小さいもの程、ばらつきが激しく、また図中で上方に位置している。

全く同じデータについて、 $Fr = U_m/\sqrt{gh_c}$ と C との関係を調べたものが図3である。ここに、 U_m は河川流の断面平均流速である。図中の記号の意味は、図2と同様である。砂移動現象に対するフルード数の物理的意味は τ_* に比べ稀薄であるものの、 C と Fr の間に強い相関が認められる。 $B/h_c < 4$ の一部のデータを除けば、回帰式として次式が得られる。

$$C + 4.9 \times 10^8 Fr^{5.6} = 11 \cdots \cdots (4)$$

山本の実験データの中には、波浪入射角が 0° のケースと 20° のケースが混在しているが、入射角の相違による影響は認められず、いずれの場合にも式(4)に従う。

図3で式(4)が右下がりの傾向を示すのは、 C が大きくなるにつれて、波の岸向き漂砂輸送力が弱まるので、

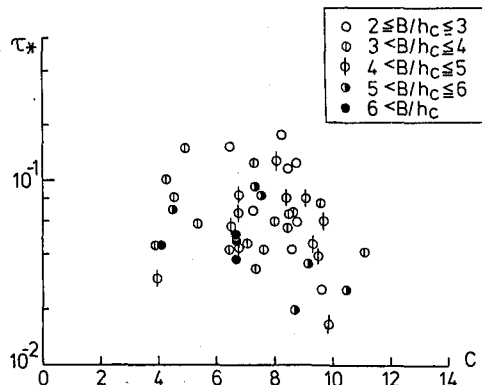


図2 河口の平衡条件(1)

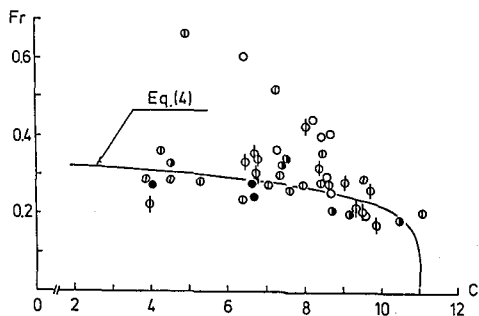


図3 河口の平衡条件(2)

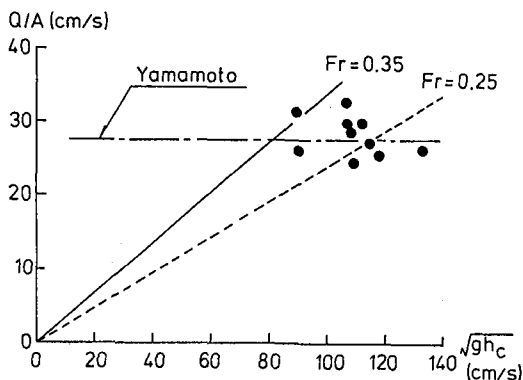


図4 流れのみの時の平衡条件

これにバランスする河川流出土砂量が少なくて済むことに起因している。

波が存在せず、河川流のみの時は、式(4)で $C=0$ として、 $Fr=0.34$ を得る。この結果と実験データを比較したものが図4である。データは、山本⁶⁾により得られたものである。実験データによれば、流れのみの時の平衡条件は $Fr \approx 0.25$ で与えられ、式(4)から得られる値は、ほぼ上限値に対応している。なお、図中の一点鎖線は、山本⁶⁾ が同じデータを用いて導いた式である。図より、式(4)は波が存在しないケースにも適用が可能であり、合理的な式であると言えよう。

式(4)は、「図1(b)のタイプⅠ・タイプⅡの境界に対応する河口形状は、非平衡河口の最終形状に等価である」とした前節の仮説のもとに導かれたものである。文献1)、文献3)の実験データを用いて、この仮定の妥当性を直接的に調べた結果を図5に示す。タイプⅠ・タイプⅡの境界と式(4)とは完全には一致しないが、比較的近い所に位置している。データ数が少ないが、前節の仮定の正当性がある程度、裏付けられた。

(3) 現地河口データの解析

解析の対象とした河川は、福島県南部の鮫川である。鮫川河口地形の変遷については、すでに青田・首藤⁷⁾ 小川・藤田・首藤⁸⁾ の論文に詳しく述べられているので、ここでは触れないこととする。解析対象とした期間における鮫川河口断面積の変化を図6に示した。この間に、昭和56年8月23日、昭和57年4月15日、9月12日、10月20日に比較的大きな出水があった。大出水の度に断面が増加し、その後、徐々に縮小していく、といったパターンが繰り返されている。

図6に示したデータを用いて、式(3)で定義される C とフルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gh_c}$ の関係をプロットした結果が図7である。横軸・縦軸の水量量としては、測量日を含むそれ以前5日間の平均量を使用している。流量としては、河川固有流量、河口部に位置する発電所の放水流量、およびタイダル・プリズムの和とした。また、図7中のデータの数字は図6のデータ点に対応している。

図6、図7の中で番号が丸で囲まれたデータは、測量前後の水量量の変化率から判断して、ほぼ平衡状態にあると判断されたものである。

図7より、平衡断面形状が満足すべき式として、次式を得る。

$$C + 273 Fr^{307} = 18 \quad \dots\dots\dots (5)$$

右辺の数値は、式(2)をもとに定めたものである。

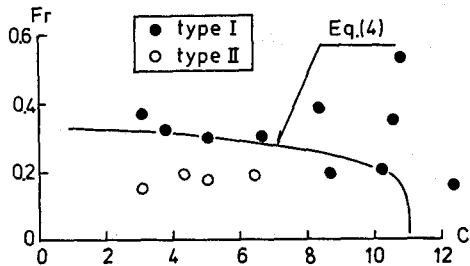


図5 河口形状の分類

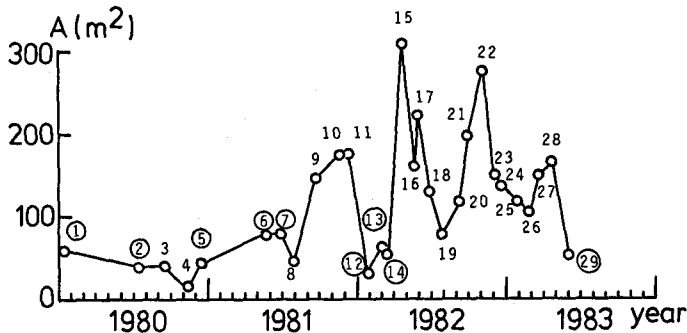


図6 鮫川河口断面積の変化

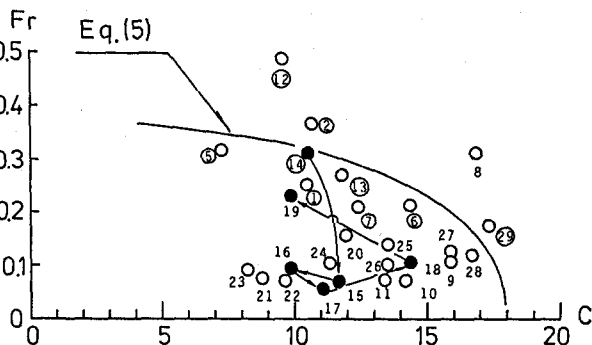


図7 河口の平衡条件(3)

図3中の式(4)、図7中の式(5)を比べて見ると、現地データがかなり右側に位置することが認められる。これは、式(1)、式(2)の対応関係と同様であって、縮尺効果によるものと考えられる。また、密度流の影響も当然、存在するであろう。今回の解析では、密度流効果を見逃しているが、今後、考慮すべき課題である。

出水の初期には、河口部は侵食傾向にあるから、図1(b)の分類に従えば、タイプIに属するであろう。しかし、この時期に測量が行われることはない。従って、図6、図7のデータの多くは、出水後の堆積傾向にあるもの、または平衡時のものが大多数である。図7で多くのデータが式(5)を表わす曲線の下側に位置するのは、このためである。式(5)の曲線から遠く離れたデータ程、非平衡性が強くなる。

図7で矢印で結んだデータは、昭和57年4月の出水に伴うC値とFrの変化を追跡したものである。当初平衡を保っている(No.13, 14)が、出水により拡幅し、出水後、極端な堆積傾向となる(No.15)。漂砂の持ち込みにより徐々に断面積を減じ、平衡状態に漸近して行く過程(No.16~19)が、C値とFrにより表現されていることがわかる。

3. 簡単な河口断面積変化モデル

(1) 河口流出土砂と岸向き漂砂の定式化

すでに前節で述べた様に、式(4)または式(5)により表現される平衡状態においては、河口流出土砂 q_B と波浪の持ち込む砂 Q_B とがバランスしていると考えられる。従って、 q_B に対してある流砂量則を仮定すれば、式(4)または式(5)を用いて Q_B が求まる。例えば、Brown型の掃流砂公式に式(5)を代入して、

$$Q_B = \frac{kd}{(sgd)^m} \left(\frac{f_c}{2} \right)^{(2m+1)/2} \{ 0.16 \sqrt{gh_c} (18 - C)^{0.33} \}^{(2m+1)} \dots\dots\dots (6)$$

を得る。ここに、 k 、 m ：係数、 s ：底質水中比重、 f_c ：摩擦係数である。

(2) 河口変化モデル

以下では、図8に示す様な単純な形状を有する砂州を考える。今、 $h = \text{const}$ 、 $L = \text{const}$ 、と考え、 B のみが変化すると考えれば、砂の連続式は次式で与えられる⁶⁾。

$$(1 - \lambda) L h \frac{dB}{dt} = q_B B - Q_B B \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 λ ：砂の空きき率である。上式の q_B 、 Q_B に対し、それぞれ、Brown型流砂量式および式(6)を代入することにより、 B の変化が求まる。ここで、波の諸元は一定で変化せず流量も一定とする。また、以下では、大出水による拡幅後の断面縮小過程の解析を行うこととして、無次元掃流力 τ_* が0.06より小さい間は $q_B = 0$ とする。この時、式(7)の解は次式で与えられる。

$$B = B_0 e^{-C_2 t}$$

$$B = \left\{ \frac{C_1}{C_2} - \left(\frac{C_1}{C_2} - B_1^{(2m+1)} \right) e^{-C_2(2m+1)(t-t_1)} \right\}^{1/(2m+1)} \quad 0 \leq t \leq t_1 \dots\dots (8a)$$

$$t_1 \leq t \dots\dots (8b)$$

ここに、

$$C_0 = \frac{kd(f_c/2)^{(2m+1)/2}}{(1 - \lambda)Lh(sgd)^m}$$

$$C_1 = C_0 (Q/h)^{(2m+1)}, \quad C_2 = C_0 \{ 0.16 \sqrt{gh_c} (18 - C)^{0.33} \}^{(2m+1)}$$

であり、また、 B_0 ： $t=0$ での河口幅、 t_1 ： $\tau_* = 0.06$ となる時刻、 B_1 ： $t=t_1$ での河口幅である。

式(8)による計算値と実測値との比較を図9に示す。計算において、抵抗則としては対数則を用い、流砂量

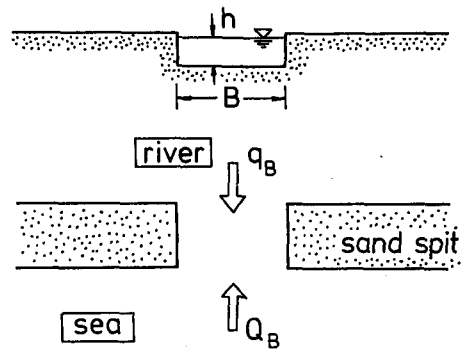


図8 河口変化モデル概念図

則については、土研公式 ($k=0.623, m=1$) と Brown 式 ($k=10, m=2$) を採用した。また、水深・流量等については、この期間の平均値を与え、初期値としては、6月15の実測値を用いた。

実測値と予測値との対応は必ずしも良好ではない。係数 k, m を適当に選べば、良好な予測値を得ることは可能であるが、ここで著者らが強調したいことは、モデルの精度よりも、むしろ、上記の様なブラック・ボックス的取扱いにより、波による漂砂量の定量的評価が行なえた点である。そもそも、河口の砂移動に対し、河川の流砂量則を適用できる保証はなく、この点については、今後実験、現地観測等により検討しなければならない。

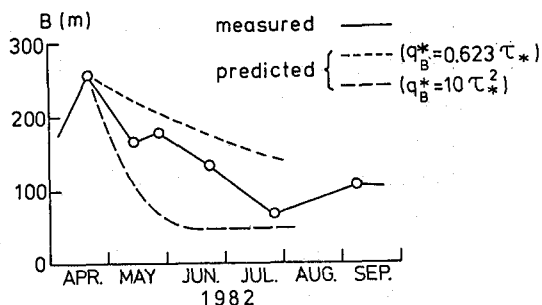


図9 河幅変化の実測値と計算値の比較

4. ま と め

本論文で得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 河口の平衡断面が満足すべき条件式として、室内実験データに対して式(4)、福島県鮫川の実地データに対して式(5)が得られた。従来の平衡条件式が、河川流量またはタイダル・プリズムと流水断面積との関係を定式化しているのに対し、今回、得られた式は、波浪の影響も考慮した形になっている点が特色である。ただし、流れ成分を代表する無次元量として、 τ_* よりも Fr がより適切であるという結果が得られた。これは、aspect ratio が小さい実験ケースにおける流れの三次元性によるものと考えられる。

本研究では、潮汐流の効果はタイダル・プリズムの形で評価されているのみである。潮汐流の影響としてはこの他に、密度流効果、干満に伴う水位の変化、水位変化が波の浅水変形、碎波変形に及ぼす効果等が上げられる。潮汐流効果については、太平洋側の河口データと日本海側のそれと比較し、その影響について検討を行う予定である。

- (2) 河口の平衡条件をもとに、波による岸向き漂砂量の定式化を試みた。さらに、その成果をもとに、簡単なモデルにより河口幅の変化予測を行ったが、良好な結果を得るには至らなかった。河川流出土砂量の算定に、従来、河川で用いられている流砂量式を用いていることが主な原因であると考えている。また、砂移動現象を線形な足し合わせで表現したことにも無理があろう。先に述べた、潮汐の効果、波と流れの相互干渉を考慮したモデル化が必要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東北大学工学部首藤伸夫教授・小川由信助手から貴重な現地資料の提供を受けた。ここに記して、深甚なる謝意を表す。また、本研究は、文部省科学研究費（自然災害特別研究、代表者・宇都宮大学工学部・須賀堯三）により行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 篠原謹爾・樗東一郎・斉藤 隆：河口付近の碎波の性質と海岸形状について、九州大学応用力学研究所報、第15号、pp. 115～127、1960。
- 2) 野田英明：河口閉塞に関する二、三の実験、京大防災研究所年報、第10号B、pp. 223～232、1967。
- 3) 銚川 登・浦野光央：河口付近における砂の堆積現象に関する実験的研究、土木学会第27回年次学術講演会概要集、第2部、pp. 75～78、1972。
- 4) 須賀堯三・松村圭二・吉成一成：河口二次元砂州に関する実験的考察、土木学会第27回年次学術講演会

概要集、第2部、pp. 79～82、1972.

- 5) 堀川清司・砂村継夫・近藤雅右・岡田 滋：波による二次元汀線変化に関する実験的研究、第22回海岸工学講演会論文集、pp. 329～334、1975.
- 6) 山本晃一：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、223p、1978.
- 7) 青田茂雄・首藤伸夫：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、1980.
- 8) 小川由信・藤田義治・首藤伸夫：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、1984.