砂浜海岸に流下する河川の河口形状に及ぼす水理・海象条件と 離岸堤設置効果の検討

River Mouth Morphology on the Sandy Beach Affected by the Hydro-oceanographic Conditions and by the Detached Breakwater

手塚公裕¹・齋藤聡明²・木村将哉³・長林久夫⁴

Masahiro TEZUKA, Toshiaki SAITO, Masaya KIMURA and Hisao NAGABAYASHI

The effect of hydro-oceanographic conditions of river mouth morphology on sandy beach was examined by the systematical experiment on variation of river discharge, sea level, and wave height and wave length. River mouth morphology was classified as three categories, stable channel with river mouth opened, meander channel which sand bar extends greatly, and barrier-spit channel formed by long sand bar. Finally, the effect of the position of an offshore breakwater affected on river mouth morphology was clarified by experiment.

1. はじめに

砂浜海岸に流下する河川の河口形状は河川掃流力による河口からの土砂の排出量と河口への漂砂の押し込み量によって、安定形状、蛇行形状、閉塞など様々な形態をとることが知られている。須賀（1972）は多くの河川の河口形状を水理量と形状から分類を行っている。形状による分類では河口を直流型、偏流型、遮蔽型としており、直流型は河川流量と潮汐による入退潮量が支配的なものが多く、偏流型は河口砂州が伸張するもの、遮蔽型は構造物や岩礁で遮蔽されるものである。全国の河川において直流型200件、偏流型140件、遮蔽型173件があり、偏流型も多いことを指摘している。

長林ら（1994）、山崎ら（1998）は福島県、宮城県、岩手県の太平洋沿岸部の中小河川の河口地形についての現地観測を実施しており、平坦な海岸や湾内に位置する河川の河口形状に及ぼす河川流量や海象条件の関係について検討している。その中で砂浜海岸に流下する河口砂州の堆積傾向は海岸に対する河口の相対河川位置に依存すること、海岸の始端や終端に近い河川ほど閉塞は少なく、導流堤などの河口処理対策工法の効果が高いことを示した。また、海岸の中央部に位置する河川は漂砂動向が安定せず河口位置の変動が激しく、時として完全閉塞に至る河川も存在する。閉塞に至る過程において河口位置が右岸や左岸に砂州が大きく伸長して背後に干潟などを形成する場合があります。福島県の夏井川や導流壁建設前の鮫川、宮城県の七北田川などの地形において確認できる。

写真-1 鮫川河口の偏寄河道の例

ここでは、写真-1に示す鮫川の河道のように砂州が大きく伸長して、単一または複数の河口を有するものを偏寄河道と定義する。

一般に、偏寄した河口は岬の近傍まで伸長し、安定して開口することも知られている。しかし、安定河道から蛇行河道、偏寄河道に至る経過や発生条件については検討事例が少なく不明な点が多い。本研究は河口が安定河道から偏寄河道に至るまでの系統的な実験を行い、河口形状に及ぼす力学的パラメータの検討を行った。また、離岸堤による偏寄河道の河口安定化への寄与についても検討を行った。

2. 実験方法及び解析方法

(1) 河口平面形状実験

実験は図-1に示す幅4m、奥行き10mの平面水槽造波装置内に前浜勾配6度の砂浜を設置し、波向き角15度の沿岸流を再現した。波向き角は夏井川河口の平均波向き角度を想定しており、安定した沿岸漂砂を与えるものとした。砂浜中央部には深さ0.02m、川幅0.1mの開削水路を設置した。本実験は砂浜海岸に流下する小河川や開削水路の河口形状を対象としており、相似則は考慮していない。海岸模型の砂の平均粒径は94.2 μ mである。図-2に河

1 正会員 博(工) 日本大学助教 工学部土木工学科
2 学生会員 日本大学大学院工学研究科土木工学専攻
3 第一建設工業(株)
4 正会員 博(工) 日本大学教授 工学部土木工学科

図-1 平面水路造波装置による河口平面形状実験

図-2 河口平面形状実験の模式図

表-1 河口平面形状実験の条件

流量 Q (ml/s)	潮位差 η (m)	波高 H_0 (m)	周期 T (s)
100	0.08	0.04	0.80
			1.00
140	0.11	0.05	1.20
			1.40

口平面形状実験の砂州堆積の模式図を示す。ここで、 h_0 は沖波水深、 h_b は碎波水深、 η は海岸面との潮位差、 H_R は平均海面からの波の打上高、 h_s は平均海面上からの砂州高、 Q_w は沿岸漂砂量、 Bq_r は河川掃流砂量である。河口閉塞は潮位が高く河口内水位との差が小さい場合に河口砂州の堆積高さが高くなり発生し易くなる(長林ら, 2006)。したがって、潮位差は開削水路の掃流力を決める因子であり、河口特性に大きく影響する。

表-1に実験条件を示す。実験は河川流量 Q 、潮位差 η 、波高 H_0 の組み合わせごとに、周期 T を4段階に変えた32ケースの実験を行った。河川流量と潮位差は水中ポンプで一定になるように調節した。実験時間は30分とし、実験後の平面形状を写真撮影した。

(2) 河口形状に及ぼす離岸堤効果の検討

海岸構造物による河口形状に及ぼす効果の検討では、離岸堤によるトンボロ形成と後背域の波エネルギーの低減効果に着目して実験を行った。離岸堤模型は市販のレンガ($B=6\text{cm}$, $H=10\text{cm}$, $L=21\text{cm}$)とし、河口部右岸を基点とし、沖合距離 Y 、沿岸距離 X 、離岸堤2個の場合は堤間隔 W を変化させた。実験で最も偏寄河道となるパラ

図-3 離岸堤設置位置概略図

表-2 河口形状に及ぼす離岸堤効果の実験条件

堤数 (個)	沖合位置 Y (m)	沿岸位置 X (m)	堤間隔 W (m)
1	0.30	0.20	0.05
2	0.40	0.30	0.10

メータを選択し、表-2の設置条件を組み合わせた12ケースについて検討した。

(3) 解析方法

河口砂州の形成に影響を及ぼす力学的パラメータについて田中(2005)は沿岸漂砂量 Q_w による河口への押し込み効果と河川流の排出効果の収支に着目して、河口部の底質の保存則から河口幅を算定する式を提案している。本実験の開削水路は流量が少ないうえに潮汐流によるタイダルプリズムを無視し、沿岸漂砂量と河川流による土砂収支のみにより河口地形を表現できるものとした。沿岸漂砂量 Q_w を式(1)、単位幅あたりの波浪エネルギーフラックス P_l は式(2)で評価した。

$$Q_w = \alpha P_l^n \dots \dots \dots (1)$$

$$P_l = (EC_g)_b \cos \theta \sin \theta \dots \dots \dots (2)$$

ここで、式(1)はSavageの条件により $\alpha=0.217$ 、 $n=1$ とした。また、式(2)の碎波点の波エネルギー E と群速度 C_g は実験装置が小型のために沖波条件を用いた。 θ は海岸線に対する波向き角度である。河川流による単位幅当りの流砂量 q_r を式(3)とし、式(4)の無次元掃流砂量 q_{r^*} は土研式を適用した。

$$\frac{q_r}{q_{r^*}} = \sqrt{(\gamma_s - 1)gd^3} \dots \dots \dots (3)$$

$$q_{r^*} = \phi(n) \left\{ \frac{hi}{(\gamma_s - 1)d} \right\}^{1.5} F\left(\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 γ_s は砂の比重、 g は重力加速度、 d は粒径であり、式(4)の水深 h はマンシングの粗度係数を $n=0.03$ とし開削水路に等流を仮定して求めた。また水路勾配 i は潮位差 η

を砂浜長2mで除して求め、 $\phi(n)=0.623$, $\tau_{*c}=0.05$ を用いた。

平均海面からの砂州高さ H_R は和田・田中(1997)による河口砂州の平衡高さの算定式(5)より求めた。

$$\frac{H_R}{H_0} = 0.303 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-13/20} \left(\frac{\sqrt{gH_0}}{w_0} \right)^{1/3} F(D_*) \dots\dots\dots (5)$$

ここで H_R はバーム高さに類似した砂州高、 H_0 , L_0 は沖波の波高と波長、 w_0 は砂粒子の沈降速度、 $F(D_*)$ は砂浜の浸透性を考慮した遡上高さの減少係数の関数である。

3. 検討及び考察

(1) 河口平面形状の検討

河口地形の分類例を図-4に示す。図の上から河道が海に向かって流下する安定河道、砂州が長く発達する蛇行河道、閉塞傾向となり河川流が砂州高の低い箇所へと流れて、複数の河口を有することもある偏寄河道に分類した。この地形変化は潮位差、流量、波高を一定とし、周期のみを変化させたもので、沿岸漂砂量の増加によって河口地形は大きく変わる。

潮位差の違いによる河口地形の変化を図-5に示す。潮位差が大きな $\eta=0.11\text{m}$ では開削水路の河床勾配が大きく、掃流力は $\eta=0.09\text{m}$ に比べて大きいために周期0.8sから1.2s

図-4 河口地形の分類例

において安定河道から砂州長の短い蛇行河道の状況となる。潮位差の小さな $\eta=0.09\text{m}$ は周期0.8sにおいても、安定河道ではあるが中州ができるなど河口地形の変化が大きくなり、周期1.0sからは蛇行河道の傾向が強くなり、周期1.4sでは漂砂下手側に大きく伸長した蛇行河道を形成する。潮位差が小さい場合には蛇行河道がより短周期から発生しており、潮位差は河道の形状に大きく影響する。

図-6は流量の違いによる河口地形の変化を示したもので、図-5に比べて波高の大きなものを示す。波高の増加

図-5 潮位差 η による河口平面形状の変化

図-6 流量 Q の相違による河口平面形状の変化

は河口の不安定さを増長しており、蛇行河道から偏寄河道が生じている。流量の小さな $Q=100\text{ml/s}$ では偏寄河道が周期 1.2s と 1.4s で認められ、複数の河口を有する偏寄河道も見られた。流量の大きい $Q=140\text{ml/s}$ では偏寄河道の場合にも複数の河口を持つことはなく、河口位置の安定化がより図られる。

(2) 河口形状に及ぼす力学的パラメータの検討

河口部付近の波の打ち上げは河川流の影響を受けるとともに、波高や周期、波向きなどの海象条件によって河口形状が変化することになる。河口形状に関する従来の研究は河口部に導流堤や堤防等の何らかの河口対策工がなされた河川を対象としたものが多く、砂浜に流下する河川を対象とした河口形状に関する検討例は少ない。以下では、前節の検討をもとに、砂浜海岸に流下する河川の河口形状を、沿岸漂砂量を河川掃流砂量で除した比で示せるものと仮定した。図-2の模式図のように河口に堆積する砂州の高さを式(5)から求め、海岸面からの高さに換算すると、潮位差を考慮して $(H_R - \eta)$ となる。この値が正の場合は海岸面よりも高く砂が堆積する。図-7に Q_w/Bq_r と $(H_R - \eta)/h_b$ の関係を示す。縦軸は海岸面を基準とした砂州高と碎波水深との比で横軸は沿岸漂砂量と河川流砂量との比を示す。縦軸が負で海岸面から下方に砂州がある場合には安定河道となり、海岸面を越えた砂州高になると蛇行河道や偏寄河道が多くなる。また、 Q_w/Bq_r が200を越えても蛇行河道、偏寄河道が増加する。これより、河口の砂州高さが海岸面よりも高くなり、沿岸漂砂量と河川掃流砂量の比がある値を超えると、蛇行河道や偏寄河道が生じることが示された。

偏寄河道の形成過程は、河川流量が少なく沿岸漂砂量が河川掃流砂量を上回る場合には漂砂に押されるように波エネルギーの小さな方向へと河口が移動して蛇行河道が発達し、河口内水位が砂州を越流した地点で新

たな河口を形成することで、偏寄河道が生じることが推定される。

(3) 河口形状に及ぼす離岸堤設置効果の検討

砂浜海岸では小河川や用水路の流れが離岸堤や岩礁の背後に開口していることが度々観察される。ここでは離岸堤によるトンボロ形成と後背域の波エネルギーの減少効果に着目して、河口形状に及ぼす離岸堤設置効果を検討した。

偏寄河道の基本地形として、最も顕著な偏寄を示したケース($\eta=0.09\text{m}$, $Q=100\text{ml/s}$, $H=0.05\text{m}$, $T=1.4\text{s}$)を選び、離岸堤を沖合距離 Y と沿岸距離 X を変え、表-2の条件により離岸堤の堤数が1の場合には4ケース、堤数2の場合には堤間隔 W を変化させた8ケースの合計12ケースについて検討した。

図-7 河口形状の力学的パラメータの検討

図-8 河口位置に及ぼす離岸堤位置及び個数の影響

図-8に堤数1の河口地形の結果を示す。Wave01R, Wave02Rは沿岸距離を変えたものであり、河口はいずれも離岸堤の背後に移動している。離岸堤より上手側の砂浜は前進しており、下手側の砂浜は後退して漂砂の補給が抑えられている。Wave03RとWave04Rは沖合距離が0.4mで沿岸距離を0.2mと0.3mとした場合であり、安定河道と緩やかな蛇行河道が見られる。沿岸距離のより離れたWave04RではWave03Rに比べて汀線の前進がより上手側で形成されている。河口前面の汀線位置はWave03Rに比べて沖側へと前進しており、沿岸漂砂の供給が回復している。堤数1において、沖合距離は離岸堤背後のトンボロの形成領域に影響し、沿岸距離が短い場合には離岸堤背後に河口が開く現象が認められた。沿岸距離はトンボロの沿岸位置を制御するとともに、トンボロ下手側の沿岸漂砂量に影響して河口形状の変化をもたらす。

堤数2の場合で沖合距離が0.3mの結果を図-9に、沖合距離が0.4mの結果を図-10に示す。堤数2は、堤数1のように離岸堤背後に河口が移動する現象は認められない。図-9では、堤間距離0.1mにおいて蛇行や偏寄河道が生じ、沿岸距離が大きいと偏寄河道となった。図-10では安定河道

が多く出現するが、Wave12Rの堤間距離0.1mのみに蛇行河道が生じた。

堤数2においては、離岸堤上手側の汀線の前進が堤数1の場合より広い領域において認められ、さらに、離岸堤下手側の汀線位置は離岸堤のない実験とほぼ同様であり、河口付近における沿岸漂砂の回復が認められる。よって、沿岸距離の短いケースでは離岸堤の後背域となるために安定河道や緩やかな蛇行河道が認められた。また、堤間隔が広い場合は堤間からの波の侵入によるトンボロ地形の変化により蛇行河道や偏寄河道認められたが、詳細は今後の検討を要する。

河口地形に及ぼす現地の水理、海象条件は対象となる時間スケールによって変わるために、今後は、より高潮位の場合や離岸堤周りの漂砂の動的平衡の確認、沖合位置や堤間隔の効果などについての検討を必要とする。

4. まとめ

本研究によって得られた主な成果を以下に要約する。

- (1) 砂浜海岸に流下する河川の河口形状に関し、河川流量と潮位、波高、周期を系統的に変化させた実験を行い、河口が安定して開口する安定河道、砂州が大きく伸長する蛇行河道、河口が漂砂下手側や上流側に大きく移動する偏寄河道が生じることを示した。
- (2) 砂州堆積高さと碎波水深比、沿岸漂砂量と河川掃流砂量比により河口形状が区分できることを示した。
- (3) 離岸堤背後に河口が安定して開口する現象を実験的に再現し、離岸堤の沖合距離、沿岸距離、堤数2の場合の堤間隔が河口形状に及ぼす効果を示した。

参考文献

- 須賀暁三 (1972) : 河口問題と現地調査, 土木学会水工学シリーズ, pp. A.6.1-A.6.18.
- 田中 仁 (2005) : 河口域の流れと地形, ながれ, 24巻, pp. 37-46.
- 長林久夫・安田禎輔・寺中啓一郎 (1994) : 平坦な海岸にある中小河川の河口変動特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 471-475.
- 長林久夫・田中 仁・Magnus Larson (2006) : 夏井川の河口変動特性と河口開削工の効果に関する検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 606-610.
- 山崎雅洋・長林久夫・木村喜代治・堺 茂樹・平山健一 (1998) : 東北地方における中小河川の河口変動特性, 水工学論文集, 第42巻, pp. 1135-1140.
- 和田尚大・田中 仁 (1997) : 河口砂州の現地調査と平衡高さの算定式の提案, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 596-600.

図-9 堤数2, 沖合距離Y=0.30mの離岸堤実験

図-10 堤数2, 沖合距離Y=0.40mの離岸堤実験