

委員会報告

河口部の水理現象と関連する諸問題

HYDRAULIC PHENOMENA NEAR THE RIVER MOUTH AND THEIR RELATED PROBLEMS

土木学会水理委員会河口部の水理現象小委員会*

*By Task Committee on Hydraulics near the River Mouth
in the Committee on Hydraulics and Hydraulic Engineering, JSCE*

1. まえがき

河口部は河川と海岸の接点として、河川流と潮汐、波および海浜流の作用を受け、そこで生じている水理現象はきわめて多様で複雑な様相を呈する。一方において、河口部の利用や保全あるいは河口処理は工学的に重要な課題であり、人間生活と密接なかかわりを有している。河口部の水理現象に関しては、河道内外の流れや波浪、土砂の移動と地形変化、あるいはそれらに及ぼす河口構造物の影響等、種々の角度から多くの調査、研究がなされてきた。しかしながら現象の複雑さと問題の多様性のために、総合的な観点からの河口部水理現象の把握は必ずしも十分ではなく、基礎研究の成果を実際の河口問題の解決に適用し得るほどの一般化もなされているとはいえない。

このような認識のもとに土木学会水理委員会は、関連する既往の研究成果を調査再検討するとともに、総合的な視点に立って河口部の水理現象の究明を推進するために、水理学、河川工学、海岸工学の研究者の参加を得て、昭和57年2月に「河口部の水理現象研究小委員会」を設置した。以来、本研究小委員会は、次の4項目に関する調査研究を進め、昭和57、58年度段階までの研究成果を取りまとめた。

- (1) 河口周辺の流れと波
- (2) 河口部の地形変化
- (3) 河口処理工法とその影響
- (4) 河口部の調査

報告書の印刷は諸般の事情により遅れているが、近く

水理委員会に提出される予定である。本文は報告書を論文集用にまとめ直したものであり、紙数の制約により内容を大幅に圧縮せざるを得なかった。このため記述が不十分な箇所も多々あろうが、今後の研究の一層の発展の一助となれば幸いである。

本研究小委員会の構成は下記のとおりである（*印は委員兼幹事）。

委員長：堀川清司（東京大学）

河口周辺の流れと波分科会：首藤伸夫（東北大学）、玉井信行（東京大学）、福岡捷二*（建設省）

河口部の地形変化分科会：鹿島遼一（電力中央研究所）、沢本正樹（東北大学）、土屋義人（京都大学）、野田英明（鳥取大学）、渡辺 晃*（東京大学）

河口処理工法とその影響分科会：榎木 亨（大阪大学）、須賀堯三（宇都宮大学）、鮎川 登*（早稲田大学）、田中則夫（運輸省）、橋本 宏（建設省）

河口部の調査分科会：白波瀬正道（建設省）、土屋 進（建設省）、服部昌太郎*（中央大学）、山本晃一（建設省）、吉田静男（北海道大学）

2. 河口周辺の流れと波

(1) 河口部の流れ

a) 河口部の流れの要因

河口部での流れを支配する要因は、運動を発生させる営力、場の境界としての地形、河水海水間の密度差の3つであり、これらの因子は相互に影響し合う。河川流の営力は重力であるが、運動の大きな変化は降水量の増減による。沿岸海域での水運動は、海流、潮流、波浪、海浜流等により生じる。地形は流れに大きな影響を及ぼすとともに、流れによって変化する。河口部ではさらに、陸水と海水の塩分や水温の相違や浮遊物質の濃度分布に

* 土木学会水理委員会河口部の水理現象小委員会
(〒160 新宿区四ツ谷1丁目無番地)

起因する密度差が、流れの構造、特に鉛直構造に大きな影響を与える。

b) 河口部の範囲

狭義の河口部としては、波浪の到達末端あるいは1潮汐時の海水到達点を上流端とし、河川流の慣性が有意な点あるいは密度フロント形成地点を下流端として定義できる。これに対し広義には、感潮域上流端から海側で淡水の存在が認められなくなる範囲までが河口部と定義され、狭義の河口部の範囲に比しその変動幅は小さい。

(2) 河口密度流

a) 河口部における流況の分類

Hansen・Rattray¹⁾は、水底と水面の相対塩分濃度差および周期平均潮流流速と断面平均淡水流速の比により、河口部の流況を4種に分類し、塩分輸送に及ぼす移流と拡散の相対的重要性を論じた。一方、須賀²⁾は、水面と水底の塩素イオン濃度の比 C_s/C_b を用いて、日本の河川下流部における混合型を、弱混合 ($C_s/C_b < 0.1$)、緩混合 ($0.1 < C_s/C_b < 0.5$)、強混合 ($0.5 < C_s/C_b$) に分類整理し、図-1を得た。

b) 土砂の凝集化現象と輸送特性

① フロック形成のメカニズム^{3),4)}

粘土やシルトなどの微粒分は、河口部で塩分に出会うと電気化学的反応により凝集しフロックを形成する。フロック形成に影響する衝突確率にはブラウン運動と流れの局所速度勾配が関与し、フロック化が進むにつれて速度勾配の効果が卓越するようになる。

② フロックの力学的性質

フロックは沈殿して界面を生じるが、沈殿層厚を h 、圧密沈下後の最終厚を h_∞ 、経過時間を t とすると、
 $(h/h_\infty) - 1 = a/t$ (1)
 が成立する。ただし沈降前期と後期で a の値が異なる。San Francisco 湾の浮泥の場合、最終的なフロック間の空隙率は0.44、密度は 1.19 g/cm^3 であった。

塩水中に浮遊させた San Francisco 湾の底泥はビンガム流体の特性を示し、ビンガム降伏値 Y (N/m^2) と浮遊粒子濃度 C (g/l) の関係は次式で与えられた。

$$Y = 5.9 \times 10^{-3} C \text{ (2)}$$

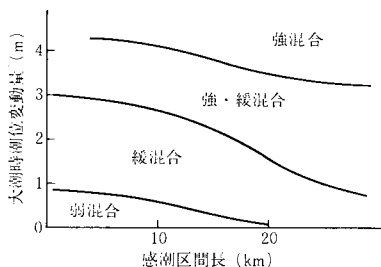


図-1 河川下流部の混合形態の分類²⁾

Thames 河口におけるフロックの沈降速度の現地観測⁵⁾によれば、沈降速度 w_s (mm/s) と体積濃度 C_v (ppm) の間には、

$$\text{小潮時: } w_s = 2 \times 10^{-5} C_v^2, \text{ 大潮時: } w_s = 2 \times 10^{-3} C_v \text{ (3)}$$

の関係があり、塩分濃度の影響は顕著でない。

Einstein・Krone³⁾は流水中での浮遊粒子の挙動に関する実験を行った。図-2は流水中でのフロックの沈降に伴う粒子濃度の変化を示す。図中破線は水路中に格子を挿入したときの結果で、格子背後の乱れにより局所速度勾配が増大し堆積率が增加する様子が示されている。

底泥の流送に関して、大坪⁶⁾は2つの限界掃流力を定義した。底泥粒子が巻き上がり始める流送限界 τ_{c1} と、河床面が破壊され大量の底泥流送が生じる破壊限界 τ_{c2} であり、ビンガム降伏値 Y (N/m^2) との間に、

$$\tau_{c1} = 0.27 Y^{0.56}, \tau_{c2} = 0.79 Y^{0.94} \text{ (4)}$$

なる関係が得られている。

③ 現地観測により得られている特性

San Francisco 湾に連なる Napa 川の河口部での放射性同位体を用いた観測⁴⁾によれば、流れにはほぼ直角に突出した栈橋の両側で堆積が目立った。これは後流域の乱れにより速度勾配が増大し、フロック形成が促進されたことによると考えられる。

Gordon⁷⁾は、潮流中での流速測定結果に基づき、平均流速が同一であっても、底面応力と乱れエネルギーは減速期には加速期の2倍に達し、これが底質輸送に大きく影響すると述べている。多摩川河口における観測例⁸⁾では、下げ潮時に浮遊砂濃度が大きくなっている。

c) 水理模型による浮遊土砂問題へのアプローチ

Thames 川の河口堰建設計画に際しては、河道約100 kmを対象とした移動床実験が行われた⁵⁾。プラスチック粒子を底質材料として用いて、浚渫後の地形変化から時間尺度を求めたのち河口堰を導入し、最適位置の選定を行った。塩分の存在下の凝集過程を含む水理実験も、Lepetitら⁹⁾により行われている。

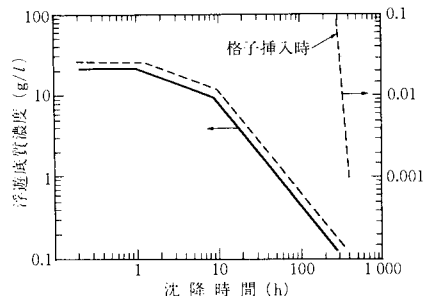


図-2 流水中でのフロックの沈降³⁾

d) 数学モデルによるアプローチ

① 粘着性粒子の輸送モデル

上記の Thames 河口堰計画においては数学モデルによる検討も行われた。断面を長方形で近似した 2 層モデルで、各層の速度と濃度は一様として扱い、鉛直拡散係数 ϵ は摩擦速度 U_* と全水深 h を用いて $\epsilon = EU_*h$ と仮定した (定数 E の最適値は 0.0067)。シルトの限界掃流力を塩分濃度に応じて増加する形におくことにより、上下層の浮遊土砂濃度の縦断方向変化に対して実測値との満足できる合致を得ている。

なお、簡単な解析モデルにより堆積土砂量の推定を試みたものとしては、Harrison・Owen¹⁰⁾の論文がある。

② 河口部における水質指標の輸送モデル

強混合の条件に対しては一次元モデルが用いられることが多いが、緩混合の場合には鉛直二次元モデルを用いた扱いがなされている^{11), 12)}。また、水平面内の分布を論じるためには水平二次元モデルが用いられる。いずれにしても、拡散係数等の係数値の設定法が 1 つの課題である。

(3) 河口流出

a) 河口条件

河口条件は河口を明確に定義づけるうえで重要であり、河口条件が与えられなければ、河口を流出する河川水の内部跳水の発生位置や塩水くさびの侵入形状等を精度よく算定することも不可能である。

河口条件に関する研究は Stommel・Farmer¹³⁾ に始まり、内部フルード数が 1 となる支配断面が河口に生じることが定常漸変流の仮定のもとに理論的に導かれた。当初はこの条件が河口密度流では一般的に成立すると考えられていたが、現地観測および室内実験の結果から、この条件が成立しない場合もあることが見出されてきた^{14), 15)}。福岡ら¹⁶⁾は、粘性や浮力に加えて流線の曲がりの影響をも考慮した解析を行い、支配断面の位置とそこでの淡水深や内部フルード数の決定法を示した。180°に広がる流出形態については、Hele-Shaw 近似を適用することにより、河口での内部フルード数 F_{i0} に対する次式を得ている。

$$F_{i0} = c(R_e \cdot h_c / B_0)^{3/8} \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 c は幾何学的形状に依存する係数、 $R_e = Q_1 / (\nu B_0)$ 、 $h_c / B_0 = |Q_1^2 / (\epsilon g B_0)|^{1/3}$ 、 Q_1 は淡水流量、 B_0 は河口幅、 ϵ は相対密度差である。

b) 海に流出する河川水の広がり

① 平水、洪水、渇水時の流出形態

柏村・吉田^{15), 17)}は、河口流出実験を系統的に行い、淡・塩水の密度差、淡水の流量および水路幅の違いにより、河口流出形態がどのように変化するかを検討し、流出形態を放射状に大きく広がる A 型から表面密度噴流の形状

に類似する E 型までの 5 種類に分類した。このような各種流出形態は実河川においても観測されており、同一河川であっても、渇水時には浮力効果が卓越して A 型が生じ、洪水時には E 型が現われやすい等、さまざまに変化することがわかっている。

柏村らは、流出形態のタイプが、2 つの無次元量の関係として、次式で規定されるとしているが、実河川の現象は必ずしも説明できていない。

$$\theta \cdot R_b^{0.137} = \text{const.} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $\theta = (\epsilon g \nu)^{1/3} / U_0$ 、 $R_b = U_0 B_0 / \nu$ 、 U_0 は河口での淡水平均流速である。一方福岡ら^{16), 18)}は、水深幅比 $A_R = h_c / B_0$ とレイノルズ数 $R_e = U_0 h_c / \nu$ を用い、両者が小さいときには A 型が現われ、 R_e が小さいときには A_R が小さいほど広がり大きいのが、実河川のように R_e が大きい場合には A_R の効果は小さいことを見出している。

また、河口を出て一度広がった河川水が途中で一時縮小し、再び広がるという複雑な挙動を示す場合がある^{16), 18), 19)}。

② 潮汐や波浪による河口流出の変化

柏村・吉田²⁰⁾は、潮汐による河口流出形態の変化を実験により調べた。潮位差が小さいときは常に順流である。潮位差が大きい場合の河川水の広がり形状は、満潮時に放射状、落潮時に噴流状で、干潮時には河川水の流速が減じ、漲潮時には逆流を生じる。このため河川水は間欠的に流出し、沖でパフ状になって広がる。

高潮に伴う河口付近の流れの変化については、中村²¹⁾により実験が行われている。また、波による河口流出の変化が Wright ら²²⁾により観測され、砕波や沿岸砂州の影響が大きいことが示された。潮汐・高潮・波浪の影響については、なお一層の研究が望まれる。

c) 河口での河川水と海水との混合

Wright・Coleman²³⁾は、Mississippi 川河口での 5 年間にわたる現地観測から、河川流と潮位の変化に伴い、河口域の流れや底面形状が著しく変化することを示した。河川水と海水の混合の程度は特に流量に左右される。また、この混合には河口域に形成された浅瀬の影響も大きい。浅瀬の上流側斜面上では乱れによる混合が著しく流れはすべて沖向きであり、浅瀬頂部の浅水域では混合は同様に活発だが流速は急速に減少し、下流側斜面上では内部跳水が生じ上下層で流向が逆になり、さらに沖側の浅瀬末端部では安定な成層状態となって外海の流れによる混合が起きている。

須賀²⁴⁾は河口流出の実測を行い、河口付近に形成される内部ジャンプ渦が連行や混合ならびに河川水の流動状況と密接に関係することを示した。吉田²⁵⁾は石狩川河口で同様な大規模な界面破壊の状況を観測している。

① 河口付近の密度フロント現象

河口付近に形成される密度フロントについては、かなり以前から観測や研究がなされてきたが、最近ではリモートセンシングデータの活用が目立っている²⁶⁾。

(4) 河口部周辺の波の挙動

a) 流れの中での波の変形

かつては、流れにのった波の波高は、波エネルギーが群速度（流れの流速と相対群速度のベクトル和）で輸送されるとして計算されていた。この扱いは、ラディエーション応力が流れに対してなす仕事が評価されていないので、誤りである。群速度で運ばれるのは波エネルギーではなく、それを相対周波数で割った波作用量であるとして扱う必要がある。

流れの時間的空間的変化が緩やかであると仮定して、平均量に対する基本方程式群が導かれている^{27), 28)}。未知量は、波高、平均水位、および波数ベクトルと平均流速ベクトルの各2成分の計6個であり、波数、質量、運動量、波作用量の各保存則が6個の方程式を与える。

波と流れの共存場で最も単純な条件は、一様流に波が重なった場合である^{29)~31)}。図-3と図-4のような結果が得られている。ただし、 L は波長、 H は波高、 h は実水深であり、添字0は流れのない深海での量を意味する。また図中の数値は、定常流の線流量 q を流れのない深海での波速 c_0 と波長 L_0 で無次元化した $q^* = q / c_0 L_0$ の値である。順方向の流れであれば波長が伸び波高は減少し、逆行すると波長は短くなり波高が増大する。鉛直方向には一様だ

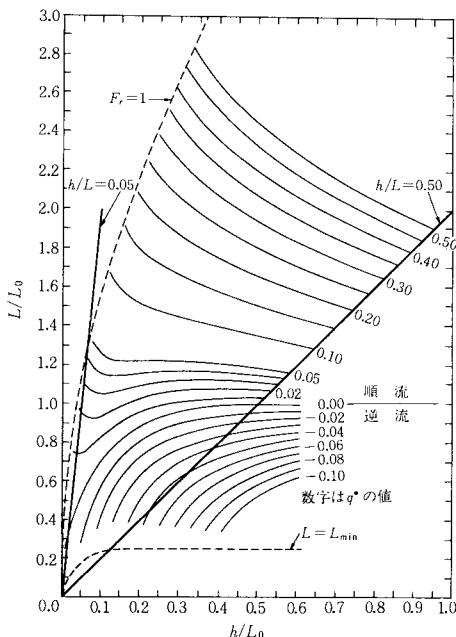


図-3 一様流中の波長変化³¹⁾

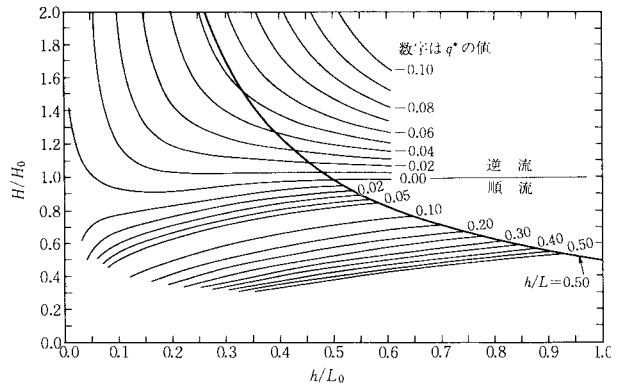


図-4 一様流中の波高変化³¹⁾

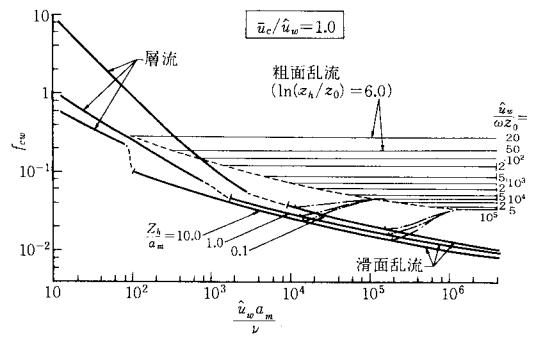


図-5 波・流れ共存場の摩擦係数⁴⁷⁾

が平面分布をもつ流れが存在する場合の問題も解かれている³²⁾。

現実の河口部付近の流れの流速分布は鉛直方向に一樣ではなく、密度効果が顕著な場合には上層と下層で流れの向きが異なることもまれではない。こうした流速の鉛直方向勾配の効果を考慮した扱いも多数なされている^{33)~38)}。

浅い水域で波高の大きい波では、非線形効果が無視できなくなる。一様流中の有限振幅波に対する計算がなされており^{39)~42)}、実験とも比較されている。流速分布が一樣でない場合の有限振幅波の変形に対する扱いもなされているが³³⁾、さらに研究を進める必要があらう。

また、一般的な平面の場での波と流れの干渉の問題に対しても研究がなされている^{28), 43), 44)}。この場合には、数値計算により波と流れに対する方程式を交互に解くことになる。

b) 波・流れ共存時の底面摩擦

定常流と波が共存している場合の底面摩擦は、波の減衰や海浜流の流速場を求めたり、底質移動の問題を論じる際に重要である。定常流における壁面乱流の古典的モデルにならない、渦動粘性係数を壁からの距離と摩擦速度の関数と仮定し、非定常境界層方程式を解く方法により、

波・流れ共存場の摩擦則が求められている^{45)~47)}。図-5は、田中・首藤⁴⁷⁾により求められた摩擦則の結果の一例であり、定常流の平均流速 \bar{u}_c と境界層外縁での波動流速振幅 \hat{u}_w が等しい場合に相当する。なお図中で、 f_{cw} は \hat{u}_w と底面での最大摩擦応力 τ_{max} を用いて $\tau_{max}=(\rho/2)f_{cw}\hat{u}_w^2$ として定義される摩擦係数であり、 a_m は底面での水粒子軌道振幅、 ω は波動の角周波数、 ν は動粘性係数、 z_n は水深、 z_0 は粗度長である。図中の一点鎖線は滑面乱流から粗面乱流への遷移域のものでやや任意性がある。境界層の遷移条件をも含め、実験的な研究もさらに進める必要がある。

3. 河口部の地形変化

(1) 海岸の漂砂

河口付近は河川流と波浪や海浜流の作用下にあり、そこでの底質移動や地形変化は複雑である。河口部に特有の地形変化について述べる前に、海岸での漂砂について略述する。

波動場にある砂粒子は非定常外力を受けるが、移動限界を考える際には非定常性の影響は小さい。過去においては、底質粒径と波高や波長の関数として移動限界水深を与える扱いが多かったが、波・流れ共存場への拡張を考えれば移動限界の底面せん断応力で扱った方がよい。Madsen・Grant⁴⁸⁾ は、一方向流中での移動限界に対するシールズ曲線が、波動場に対しても近似的に適用できることを示した。

移動限界を超えて底面せん断応力が増加するにつれて、底質の移動形態は、掃流往復運動、砂漣上の渦による浮遊、シートフロー状の移動と、段階的に移行する。波動場における移動形態の区分は、金子⁴⁹⁾や Shibayama・Horikawa⁵⁰⁾ 等によりまとめられているが、波と流れが重なった場合についてはまだほとんど研究がなされていない。

海岸での漂砂は沿岸漂砂と岸沖漂砂に分けて扱われることが多く、前者の漂砂量式として次式がよく使われる。

$$Q_x = \alpha E b^n, \quad E_i = (E c_\theta)_0 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 Q_x は沿岸漂砂量、 E 、 c_θ 、 θ は波のエネルギー、群速度、波向角で添字 b は砕波点での値を意味する。一方、岸沖方向の漂砂については往復運動の差としての正味の量が問題となるが、一般的な条件に対して正味の漂砂量を与える算定式は確立されていない。波半周期間の平均漂砂量 \bar{q} については、Madsen・Grant⁴⁸⁾ による式、

$$\bar{\phi} = \bar{q} / w_0 d = \beta \phi_m^2 \dots \dots \dots (8)$$

が適用できそうである。ただし w_0 は沈降速度、 d は粒径、 ϕ_m は底面せん断応力の振幅で定義したシールズ数であり、限界シールズ数の2倍以上ならば β は12.5の

値をとる。この式は Einstein・Brown の流砂量式を波動場に準用して求められたものであるが、山下・沢本⁵¹⁾ は、砂粒子運動の素過程に立脚した扱いにより、ほぼ同一の関係をj得ている。砂漣が発生し浮遊砂が卓越する条件や、砂漣が消滅してシートフロー状の砂移動が生じる場合についても、上式と同様の関係が成立することが報告されている^{50), 52)}。

(2) 河口周辺の地形

河口から供給される土砂を運び去る沿岸の波や流れの強さにより、河口入江(エスチュアリ)の形態をとったり三角州や尖角岬が形成されたりする。また日本の多くの河口のように土砂が豊富な場合には河口砂州がみられる。山本⁵³⁾ は河口砂州の発生を2種に大別した。1つは洪水後の河口前面の浅瀬に波により打ち上げられて生じる二次元砂州であり、もう1つは河口がある程度深い場合に生じる三次元砂州で、河川流と波との作用の強弱によりその形状が変化する(図-6)。

日本の河川では流出の変動が大きく、河と海の作用のバランスのもとで形成される河口地形の変動も大きいため、人工構造物によりこれを制御する試みがなされてきた。延長10 km以上の全国513河川について調べてみると、人工構造物がほとんどないとみてよい自然河口は、大河川(流長100 km以上)では52河川中3河川に過ぎず、中小河川(10~99 km)でも20%程度である。関東・中部では特に自然河口が少ない。自然河口95中40%では砂州が存在するのに対し、人工河口418中で砂州が存在するのは約20%であり、特に両側に導流堤(突堤)を有する河口63中で河口に砂州が発生しているのは4例に過ぎない。

(3) 河口部の土砂収支

a) 土砂収支の考え方

① 現象のスケール

河口における土砂収支をどのような時間空間スケールで考えるかはきわめて重要である。山本⁵⁴⁾ は考えられる時間スケールとして、1万年のオーダーの地質学的時間、

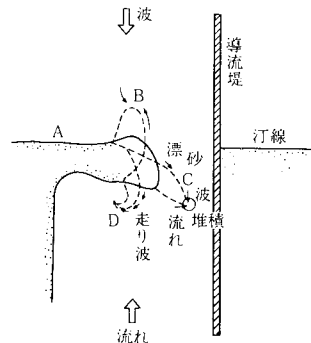


図-6 河口砂州の変化

1000年から100年，数10年から1年，月から週，時間から分程度への区分をしており，また空間スケールとしては岬などで区切られた砂浜の海岸線延長程度を中スケールとして，工学的には海岸線の向きや侵食堆積傾向などの大スケールの条件を境界条件とし砂州の消長などの中規模スケールの現象を解析予測すればよいと述べている。

② 河口における土砂循環の支配要因

河口では河川流，波浪，潮汐などが主外力であり，潮汐と波浪の影響の大小により，河口を潮汐支配型と波浪支配型に分けることがある。わが国のほとんどの河口は波浪支配型で，河川流と波浪が主要な営力となる。

③ 土砂収支

海岸の土砂収支を考察する場合には，できれば岬などによって区切られた区間を対象とすると扱いやすい。隣接海岸より流入する沿岸漂砂や河川からの流送土砂および海崖からの土砂が主な漂砂供給源であり，他方，流出する沿岸漂砂および離岸漂砂が主な流出要因となる。

土砂供給のうち最も重要なのは河川からの流送土砂である。図-7は大河津分水工事に伴う新信濃川の河口デルタの形成を示し，約10年程度の時間スケールの土砂収支の好例である。もともとわが国では近年，ダム堆砂などの原因により河川からの土砂供給量が減少し，河口デルタが縮小してきている例が多い。なお，河川の流送土砂量については種々の流砂量公式が提案されているが，どのような粒径の底質がいかなる割合で海岸土砂収支に寄与するかはほとんどわかっていない。

海崖の後退も海岸の土砂収支の観点からは供給の1つである。堀川・砂村⁵⁵⁾等により調査研究がなされているが，たとえば屏風ヶ浦海岸での崩落土砂量は年間30万m³にも及ぶといわれる。

b) 河口デルタの形成

河口デルタの形成には2つの要因があるといわれる。その1つは，河川が海や湖などの広い水域に流入すると，流送土砂がデルタ状に堆積するものであって，細粒の土砂は沖へ運ばれ，比較的粗いものが沿岸に残留してデルタ地形を形成する。

① 波浪の影響が無視できる場合

河川が波浪などの影響を受けない水域に流入する場合のデルタ形成について，Chang⁵⁶⁾は実験を行い，流送

土砂量を一定とするとデルタの面積は時間とともに直線的に増加することを見出した。Changはこのデルタ形成過程を説明するために，数値モデルによる検討も行っている。すなわち，デルタ上を流れる水流はその幅が場所と時間の関数となるとして通常の開水路水流の基礎方程式を用い，さらに流砂の連続式ならびに流れエネルギーの最小の原理を適用することによって，デルタの形成とそれに伴う流水の特性を求めた。網状のような流路系に対しての適用は困難であるが，デルタの形成過程を知る1つの方法として評価できる。

② 波浪の影響が顕著な場合

デルタ形成に波浪の影響が支配的な場合に対する扱いは多くは，海浜変形の一次元(1-line)モデルの応用としてなされてきた^{57)~61)}。たとえば土屋・安田⁵⁹⁾は，漂砂の連続方程式に若干の近似を施して得られる次式

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)h_0} \left[\left(\frac{\partial Q_x}{\partial \theta_0} \right)_0 \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} + q_R(x, t) \right] \dots\dots (9)$$

と式(7)の形の沿岸漂砂量式を組み合わせるとその解析解を求めている。ただし， y_0 は初期海岸線よりの前進量， h_0 は漂砂帯外縁水深， λ は底質空隙率， θ_0 は碎波角， Q_x は沿岸漂砂量， q_R は単位幅当たりの河口流送土砂量である。図-8は結果の例で，汀線位置 y_0 と河口幅 B は h_0 で無次元化してある。また， $t^* = t(\partial Q_x / \partial \theta_0) / (1-\lambda)h_0^3$ は無次元時間である。これによると無次元河口幅 $B^* = B/h_0$ のデルタ形状に及ぼす影響は先端部を除いてはそれほどには著しくない。解析解が求まるのはごく単純な条件に対してのみであり，一般には数値計算が必要となる^{60), 61)}。

c) 河口デルタの縮小

波浪の作用による河口デルタの縮小過程についても，形成過程に対してと同様の理論的扱いがなされている。

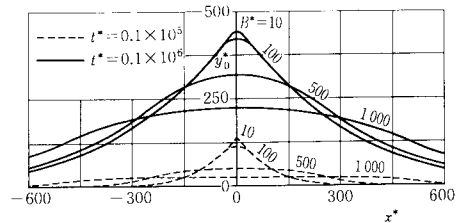


図-8 河口デルタの発達とその形状⁵⁹⁾

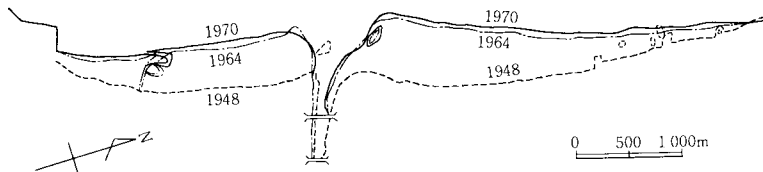


図-7 新信濃川河口におけるデルタの発達

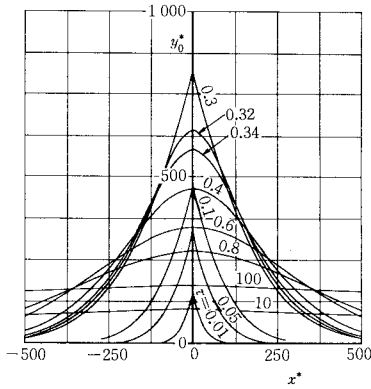


図-9 河口デルタの縮小過程⁵⁹⁾

図-9は計算結果の例で、デルタ形成の途中で河口からの流送土砂量が減少した場合の縮小過程を示す。流送土砂の減少効果はまずデルタ先端部に現われるが、河口から十分に離れた場所ではなお堆積傾向を続け、減少後の流送土砂量に対応した平衡デルタ地形へと漸近していくという結果になっている。同様の結果は、橋本⁶¹⁾による数値計算でも得られているが、精度のよい定量的予測は今後の課題である。

近年目立つ河口周辺での海岸侵食は、流送土砂量の減少による河口デルタの縮小としてとらえることが可能な場合が多いものと思われる。

(4) 河口砂州と河口断面変化

a) 河口砂州の実態

河口砂州の実態についてはかなり古くから調査されているが、特に島根県神戸川河口に関する佐藤⁶²⁾の先駆的研究は注目される。潮汐の影響は小さいので無視し、漂砂を生じさせる波浪にかかわる量として海風風速を選び、それと河口流量とが河口幅とどのような関係にあるかを調べた。その結果、流量が小さく海風風速が大なるほど河口幅は小さくなるが、流量が10 m³/sを下らなければ河口の完全閉塞は生じないことなどが見出された。

次に本間・堀川ら⁶³⁾の相模川河口に関する調査研究が挙げられる。相模川では漂砂による河口閉塞傾向が甚だしく漁船の航行等に支障をきたしていたので、1951年より導流堤工事が行われ、これに伴い調査がなされた。そして相模川河口砂州の消長にとり最も重要な要素として固有流量と潮汐作用が指摘されるとともに、固有流量と河口幅間の関係や、流量低下率と河口閉塞率の関係等が調べられた。相模川ではその後も数多くの調査がなされている⁶⁴⁾。

島根県江ノ川河口における河口砂州の変遷過程をみると、1960年頃までは河口砂州の変動が激しく左右両岸から砂州が伸びていたが、左岸に導流堤を設置した後は、

河口砂州は常に右岸から発達している。このような導流堤の効果は他の河口においても認められている。

b) 河口砂州の水理特性

河口砂州の消長過程には波浪や河川流、潮流、河口付近の地形、人工構造物などが影響するので、その水理特性はきわめて複雑であり、それを解明するためには単純化した条件のもとで各要素の効果を調べる必要がある。

① 河口砂州に関する二次元実験の結果

河川流と波浪による河口砂州の形成に関する二次元実験の結果に基づき、野田⁶⁵⁾は河口砂州の発生形態次のように分類した。砂州頂面が水面上に出るⅠ型(堆積型)、水面下にあるⅡ型(遷移型)および河口付近の砂が沖に運ばれるⅢ型(侵食型)の3段階であり、どの形態をとるかは河床水深にも大きく影響される。鮭川⁶⁶⁾はこの河床水深の影響を、一般の海浜での沿岸砂州の発生限界における沖波波高の効果の中に入れて考え、 $H'_0 = \alpha H_0$ として実測沖波波高 H_0 を換算した H'_0 を導入し、砂州の形態(発生限界)を H'_0/L_0 と H'_0/d (L_0 は沖波波長、 d は粒径)との関係で図-10のように整理した。ただし、 α は

$$\alpha = 1 + [0.55 + 1000(\bar{u}/c_0)^{1.5}](h_r/H_0)^{1.5} \dots \dots \dots (10)$$

で与えられる。 h_r は河口部水深、 \bar{u} は河川流の平均流速、 c_0 は沖波の波速である。

② 河口の断面特性

潮流の影響が著しい河口では、その最小流水断面積がタイダルプリズムとはほぼ比例関係にあることが、O'Brien⁶⁷⁾によりアメリカ太平洋岸の河口調査に基づき指摘された。吉高・島田⁶⁸⁾は、土佐湾沿岸や宮崎海岸の

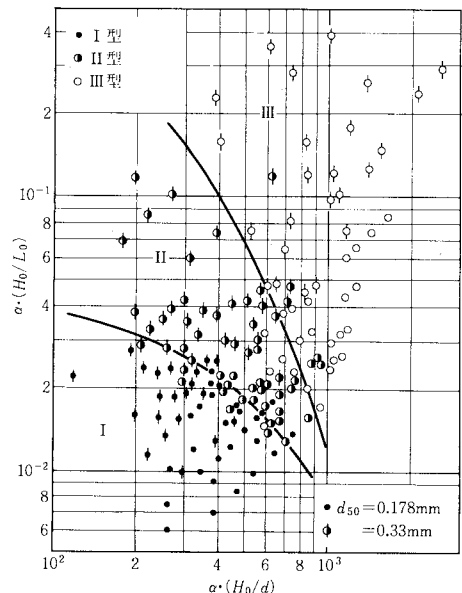


図-10 河口砂州の発生限界⁶⁶⁾

河口に対する資料を整理し、わが国の河川でも同一の傾向があるとした。

一方、潮流の影響が小さいときの流水断面積あるいは河口幅は、河川流と沿岸漂砂の相互作用によって定まる。洪水時等に拡大した河口断面は、その後の漂砂で徐々に縮小し低水時の河川流量に対応する断面に近づく。榎木⁶⁹⁾は実験によって、断面縮小の程度と河川流速（掃流力）および沿岸漂砂量の関係を求めた。

出水時に拡幅された河口幅と直接関係する流量を、佐藤⁶²⁾は河幅支配流量とよび、本間・堀川ら⁶³⁾は河川固有流量とよんでいる。これに対し、平・低水時に縮小して平衡状態になったときの最小河口幅 (B_e) に対応する流量を、野田⁶⁴⁾は河幅下限流量 (Q_m) とよび、神戸川や江ノ川について B_e と Q_m の関係を調べた。両者の関係は山本^{53), 70)}により他の諸河川についても調べられており、 $B_e \propto (Q_m)^n$ の関係が見出されているものの、指数 n や比例係数の値は各河川により異なる。図-11 に天神川と神戸川の河口幅 B と流量 Q の関係を示す。

c) 河口断面の変化過程の数値モデル

河口砂州研究の主要課題になりつつある河口断面の変化過程の数値予測モデルには、洪水による河口の拡幅過程を対象とするものと、沿岸漂砂と河川流とが均衡するまでの河口幅縮小過程を計算するものがある。

① 河口滞砂のフラッシュに対するモデル

中村・佐々木⁷¹⁾は、石川県河北潟放水路河口を対象に、洪水前の滞砂状況すなわち河口断面積、洪水期間中の流量と河口付近の水位勾配、および洪水後の河口断面積を測定し、これらのデータから洪水期間中の河口断面積の増大過程を数値計算により追算した。水位勾配から摩擦速度を求めて Brown 型掃流砂量公式により河口の掃流砂量を評価するとともに、粗度係数 n の評価も行っている。その結果、掃流砂量公式中の係数値として通常いわれている 10 に対し 1.2 程度にとる必要があることや、 n が 0.05 程度と大きな値をとることがわかった。

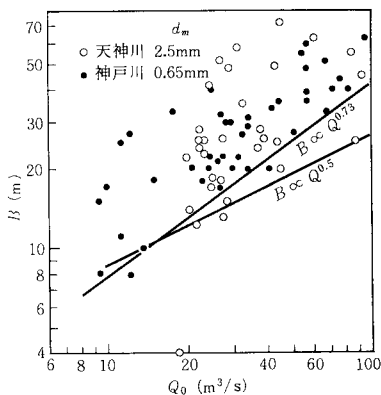


図-11 河口幅と流量の関係⁷⁰⁾

② 河口断面の変化モデル

河川流と潮流により河口から海域へ掃流される単位幅当たりの流砂量を q_b 、波浪による単位幅当たり沿岸漂砂量を Q_u とし、河川流と潮汐流が河口の土砂を排除する一方、漂砂が河口に砂礫を搬入すると考えると、河口部の土砂量 V の変化は次式で与えられる。

$$(1 - \lambda)dV/dt = (Q_u - q_b)B \dots\dots\dots(11)$$

ここに B は河口幅、 λ は砂の空隙率。青田・首藤⁷²⁾は、 $V = LhB$ において河口砂州の奥行幅 L と水深 h を一定とし、 q_b には Kalinske・Brown 型掃流砂量式、 Q_u には Caldwell 型漂砂量式を用いて、上式により阿武隈川の河口幅変化過程を計算している。また流量や波浪条件が一定の場合に対する安定河口幅の式を与えている。

一方宇多⁷³⁾は、海浜変形の 1-line モデルを適用して、相模川河口における砂州の発達過程を計算し、実測データにより検証した。

4. 河口処理工法とその影響

(1) 河口閉塞防止工法

a) 従来の河口閉塞対策

① 導流堤工法とその効果

従来の河口処理工法の代表的なものとして導流堤工法がある。導流堤が河川の疎通能力と掃流能力を増大して、河口前面に堆積した砂州をフラッシュする効果をもつことは昔から認められている。しかしそのフラッシュ効果は導流堤の長さや開口部の幅により大きく変化する。

榎木・小舟⁷⁴⁾は、導流堤の長さや開口幅の変化に伴う河川流の掃流力と砂州河口部断面積の関係を移動床実験で調べ、導流堤が短い場合には前面に砂州が形成されるので流出断面積は導流堤の開口幅により規定されること、導流堤が十分に長い場合には砂州の発生が直接抑制されて初期の開口部断面積が保たれることなどを見出した。

導流堤には沿岸漂砂を遮断して河口砂州の発生を阻止する効果もあるが、その場合でも導流堤はある程度の長さをもたないと砂州の抑止効果は期待できない⁷⁵⁾。ただし、沿岸漂砂の遮断により漂砂下手側の海岸に侵食を生じることも多く、また図-12 に示すような河口遮蔽型の導流堤の場合には遮蔽域では波高減衰のため堆砂が生じるおそれもある。図-13 の垂直型導流堤の場合でも、砕波帯内にしか延びていないと、途中で堆砂が生じる⁷⁶⁾。

② 導流堤の配置形状

導流堤の基本的配置は、図-12(a) と図-13 に示される二本導流堤と、図-12(b) と図-14 のような一本導流堤に大別できる。二本導流堤は、砂浜海岸に河口があり沿岸漂砂が卓越する場合にそれを阻止することを主目的として設置される場合が多く、沿岸漂砂の卓越方向

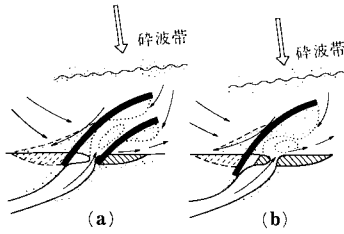


図-12 河口遮蔽型導流堤

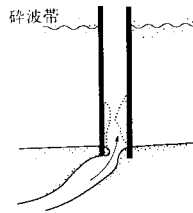


図-13 垂直型導流堤

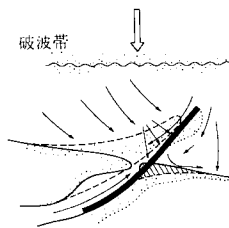


図-14 一本導流堤

が変動する海岸では図-13の垂直型が適する。一本導流堤は、他岸側が崖の場合や河川の固有流量がある程度あって河口の位置を固定しようとする場合に用いられる。

導流堤の効果は河川流や波浪・海浜流の条件に左右されるため一律には論じ難く、配置計画に際しては水理模型実験により決定しようとする試みがなされている⁷⁷⁾。碎波現象等を含むため一般に無びずみ模型で実験がなされ、底質移動の相似性を満足するために軽量底質を用いることが多い。しかしながら、波と流れ、およびそれぞれの作用下での底質移動の相似性をすべて満たすことは一般に困難である。近年では数値シミュレーション手法も用いられるようになってきた⁷⁸⁾。

③ 暗渠工法

計画流量が小さく陸地地盤が高い場合で、波の打上げ高が大きくて漂砂が導流堤を越えて河道内に堆積しやすいところでは、暗渠工法がよく用いられる。しかし暗渠工法に関する水理学的研究はきわめて少ない。

豊島^{76),79)}は各地の暗渠工法を実地踏査し、成功例の特徴を次のようにまとめた。1) 暗渠の吐出口の底高を高くとる、2) 暗渠の正面は閉じてゲートか横吹き式(図

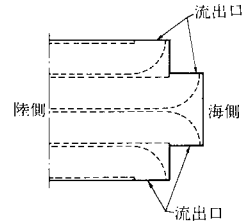


図-15 横吹き式暗渠(平面図)

—15)を採用する、3) 暗渠を多列にする、4) 暗渠の吐出口の断面を入口断面より低くする、5) 吐出口の形状を傾斜型あるいは丸型にし波力の作用を弱める。一方、失敗例の原因としては、波力による吐出口の破損や暗渠内への堆砂による機能喪失等が挙げられる。

④ 人工開削

人工開削は目的により2つに分類される。1つは河口を大幅に掘削し長期間にわたっての水深と河積維持を目指すものであり、開削後の堆積に対する事前予測調査が必要となる。一般に波の影響の小さい河口において採用されることが多いので、河川の流下土砂による堆砂計算が行われる⁸⁰⁾。いま1つは、砂州の一部を出水前に開削して砂州のフラッシュを助けるものである。この場合には、波が存在する条件での河川流のフラッシュ能力⁸¹⁾を調べておく必要がある。

⑤ 飛砂対策

静岡県菊川の例にみられるように、飛砂が河口閉塞の原因の1つになる場合も少なくない。飛砂そのものに関しては古くから研究されており、飛砂量と摩擦速度の関係等も明らかにされているが、飛砂防止工に対しては一層の研究が望まれる。

b) 新しい河口閉塞対策工法

いまだ実績は乏しいが、今後の発展性のある河口閉塞対策工法を以下に列挙する。

① 離岸堤工法

離岸堤2基を河口部前面に設置することにより、河口隣接海岸の侵食防止と、トンボロ形成による河口部の安定を図れる可能性がある。ただし河川の疎通能力の向上はあまり期待できない。

② 離岸堤と暗渠工法の併用

横吹き式の暗渠のみでは沿岸漂砂により開口部に砂が堆積し排水機能が低下する危険性が高いので、離岸堤を2基設置し、その開口部に横吹き孔を配置することが考えられる。

③ 新暗渠工法

ハワイ大学で開発された工法で、V字型の有孔スラブ構造を有している⁸¹⁾。閉塞状態で河川流による上流部水位上昇が生じると、V字型最奥部付近の閉塞砂州が浸透

水によりまず崩壊し、それが全体に進むことを期待するものである。

④ 貯砂ポケット工法

河川流による流送土砂が河口部に堆積するのを防ぐために、航路部の上流にあたる一部をあらかじめ深く掘り下げておく方法であるが、貯砂ポケットによる捕砂率や堆積過程に関する研究⁸⁰⁾の進展が望まれる。

c) 河口対策工法の周辺部への影響

導流堤による閉塞防止効果をあげるにはある程度の水深まで導流堤を延長する必要があるが、これにより沿岸漂砂が阻止され下手側海岸に侵食を生じる。この下手側の侵食対策のためには、サンドバイパス工法等が必要となる。

① 暗渠工法の影響

導流堤の場合と同様に、下手側に著しい侵食を招く場合があり、また暗渠基部で洗掘を生じやすい。

② 人工開削および貯砂ポケット工法の影響

開削や掘削に伴う水深変化のために、波浪や流れの場も変化し、その影響が周辺部の地形変化となって現われるおそれがある。

(2) 河口部の水質対策

a) 海水侵入長の増大防止と塩害対策

河道内への海水侵入長の増大をもたらす主要な原因には、1) 取水量の増大による流量の減少、2) 河口処理に伴う河口部の水深と流路幅の増大、3) 掘削や拡幅等の河道整正、などがある⁸²⁾。

対策としては以下の方法が挙げられる。1) 河口幅を小さくしたり、洪水時にフラッシュ可能な程度まで河口砂州の発達を促進することにより、河口部での損失を大きくする。2) 潮止工や河口堰により海水侵入を強制的に制限する。河床高が高くなっている区間があるときにそれを維持して海水侵入を抑えている例もある。3) 河口前面の海域部の浅瀬を維持し、水温上昇により海水密度を低下させるとともに砕波によって淡水との混合を促進する。4) 気泡の放出や、流路幅急縮による逆流渦によって、開口付近での成層度を小さくする。5) ダム放流等により河川流量を増大させる。6) 取水時間を調整したり、取水口の位置を工夫する。侵入長は季節的な流量と水温の変化や潮位変化によっても変動を示す⁸³⁾が、これを予測するとともに各対策工の効果を定量的に把握しておくことが肝要である。

塩害⁸⁴⁾に対する対策には以下の方法が単独あるいは複合的にとられる。1) シートウォールや矢板の設置、2) 高水敷の表面を不透透性の材料で覆うブランケット工法、3) 塩分を含む河川水の堤内地への侵入を防ぐための承水路、4) 伏流水や浅層地下水の汲み上げ規制、5) 客土や地上げ。

b) 停滞水の水質悪化対策とヘドロの除去

河口閉塞に伴う停滞水の水質悪化対策としては、1) 河口流水断面の拡大による水はけ改善、2) 感潮部水面積の増大による入退潮量の増加、3) ダム操作による河川流量の増大、4) 浄化用水の導入、などがあるが、浄化装置を設置して汚濁負荷量を減らすことが基本的解決策である。

河口部に沈降堆積したヘドロの除去には、経済性のほかに、ヘドロの巻き上げ⁸⁵⁾と沈降現象、および浴出現象⁸⁶⁾などが問題となる。

(3) 河口部の波浪対策

大潮時等に河道内に波浪が侵入して両岸の堤防に打上げ越波を生じる場合があり、また波により河口に砂州が形成されると洪水の疎通が悪くなり漁船などの航行に支障をきたす。

河道内への波浪の侵入を防ぐ方法の1つとして、河口砂州を維持し、浅瀬によって砕波を生じさせることも行われている。須賀・山田⁸⁷⁾は、江戸川河口部を対象にして模型実験を行い、浅瀬による河道内の波高減衰を調べた。また一般に河道中央では水深が大きく両岸では浅いが、このような断面形を維持すれば、河道内に入った波が両側に向かって屈折し砕波することによりエネルギーを失うことも期待できる。

導流堤は河口の位置を固定し河口部の河積を確保するために設けられるのが通常だが、河口部への波の侵入を防ぐためにも用いられる。日立港の拡張のために久慈川の河口を南へ移した際には、河口付近の河道が直接外海に向き波浪の侵入が増大するおそれが生じたので、模型実験を行って、波浪侵入を防止し、洪水流出に支障をきたさないための導流堤の配置等を決定した⁸⁸⁾。

洪水の流下に支障を与えずに波の侵入を防ぐ工法として河口部の河道両岸に消波工を設置する場合がある。これは上流に向かって進む波が消波工によりエネルギーを失うことと、堤防への打上げ高が減少することをねらったものである。松村⁸⁹⁾の実験によれば、消波工を設置した場合には打上げ高は約半分となり、河道内波高も低下する。河口対策としての実施例はないが他に提案検討されている波浪侵入対策工法としては、橋梁⁹⁰⁾、暗渠、離岸堤、浮防波堤などがある。

(4) 航路維持

河口航路の維持対策には、1) 河道変更(分水)による河川流下土砂量の低減、2) 流れの制御による水深維持、3) 浚渫による水深維持等の方法がある。

わが国において河口港の埋没対策として河道の分離が実施された例としては、新潟港(大河津分水、関屋分水)、秋田港(雄物川放水路)、伏木港(庄川の分離)、石巻港(北上川柳津分水)などが挙げられる。これらの分水工は、

河川の洪水制御に主目的があったが、河口部への流下土砂の減少にも大きな効果をもたらした。ただし、微粒浮遊物を多量に含有する大陸の大河川にあっては、流速の低減が浮遊物の沈降と埋没を助長する場合も考えられる。

河道内の流れを水制工や導流堤によって制御して航路部分に集中させ、河川排出土砂の沈降堆積を防止し、あわせて堆積土砂をフラッシュする工法もとられている。また、河道内において航路泊地部分を河道部分から堤体によって区割する背割堤も、酒田港や新潟港で実施されている。

河口港においては維持浚渫がどうしても必要となるので、効率よく、港湾機能を阻害せずに実施するために、ポケット浚渫等の方法がとられている。

5. 河口部の調査

(1) 調査の目的と調査項目

河口処理対策に直接役立つ資料を得るための調査か、または河口部での現象解明に重点を置くのかにより、調査の内容、規模、方法が異なる。前者の場合は、個々の河口部の特性把握という地域性の強いものになり、水理現象の調査のほかに、社会・経済・環境調査が行われる。一方、現地での実際現象を正確に把握し、理論的考察に基づいて得られた知見を普遍化しようとする研究指向型の現地観測も盛んに行われるようになってきた。

水理現象の計測観測を行う際には、対象とする現象の時間的空間的規模をも十分考慮して調査法を決定し、また得られたデータの解釈を行うことが重要である⁹¹⁾。現在標準化されている河口部の調査法^{92),93)}は、中間的規模以上の河口現象を対象としているが、河口水理現象の解明のためには、微視的規模のデータも不可欠である。また、水理量、水質、地形等の計測をできるだけ同時に行い、諸因子間の相互関係を明確にし得るような観測を行うことが肝要である。

(2) 水理量観測法

a) 流速や流況の観測

① 流速・流況観測法

固定点での流速測定には、回転型流向流速計、電磁流速計、超音波流速計等が用いられる。かつては回転型流速計が使われることが多かったが、河口域での流れの特徴である流速変動に対する応答性が良好でないため、電磁流速計や超音波流速計の使用頻度が増えている^{94),95)}。また、河口部での諸現象に対する乱れの効果の重要性が認識されるようになるにつれ、上記の流速計のほかに、現地観測用に改造された熱膜流速計⁹⁶⁾やレーザドブラー流速計⁹⁷⁾等も使用されている。

流速測定用の追跡浮子に関しては、表層付近のみなら

ず中下層での流速を測るための工夫がなされてきた⁹⁸⁾。また、流況観測には浮子のほかに染料や水の温度もトレーサとして利用され、航空機、バルーン、人工衛星等からの写真撮影がなされている。今後のリモートセンシング技術の向上により、より高精度で広範囲の流況データの取得が可能となることが期待される。

② 河口部での流速・流況の観測例

田中・首藤⁹⁹⁾は、福島県鮫川河口での流速と水位変動の同時測定を、二成分電磁流速計と容量式波高計を使用して実施した。それによれば、潮汐に起因する周期的流速変化が認められるが、河口付近では重複波性になるため水位変動との間に明瞭な位相差が存在する。また、順逆流の変換期には、成層化のため上下層での流向が異なり流向変動が激しいことや、乱れ強度の時空間分布から、落潮時に水面より生じた乱れが下層部に広がっていくことを報告している。

利根川河口での洪水時の流況を調べるために、須賀・高橋¹⁰⁰⁾は航空写真を利用し、表面流速分布の図化を行うとともに、河道湾曲部のらせん流によるボイルの形成や導流堤沖側での内部ジャンプに関する解析を行っている。

田城ら⁹⁷⁾は天塩川河口部の二層流場の乱れをレーザドブラー流速計により実測した。各水深での乱れ強度の分布特性によれば、水面での風波による乱れに次いで、界面で発生する乱れが大きい。また、平均流速変動のワースペクトルのピーク周波数が界面位の変動周波数にほぼ一致する。

鷲見¹⁰¹⁾は2台の三成分超音波流速計を用いて東京湾内での潮流流速の鉛直分布を測定し、平均流の定常性が高い状況では乱れの周波数スペクトルが $-5/3$ 乗則に従うが海底面付近の境界層内は層流であることを見出した。

b) 水位・波浪の観測法

河川水位や潮位のように変動が緩やかな場合と、波浪のように水面変動速度が大きい場合とでは、その測定法も当然異なる。河川の水位や潮位の観測には、観測装置内の水位変化を自記水位計で記録する方法と、水位標等を使用して目視により水位を測定する方法とがある。

波浪による水面変動測定は、電気抵抗式、容量式、超音波式、水圧式、ブイ式などの波高計や、写真撮影等の光学的記録による方法によりなされる。波高計は定点での水面変動を測定するものであるから、波向や波の変形などを調べるためには波高計アレーとして用いる必要がある。これに対し光学的手法は、波向などの観測に適するが、水面波形や波高データを得るにはステレオ写真撮影を行わねばならない。

(3) 河口地形調査法

汀線や地上地形の測量は、旧来の測量手法、あるいは航空写真測量によりなされる。深淺測量は、浅い水域ではスタッフやトランシット、レベルを用いたり、格子状に配置したボールの水底高を直接読み取るポールアレイ法によりなされ、深い水域は船上から重錘や音響測深機を用いてなされる。

水面下の地形を空中写真より求める方法として、1) ステレオ画像を用いる手法、2) 画像の色調あるいは濃淡と水深の関係を利用する手法等がある。前者は日本海沿岸で水深 10 m までの海底地形測量に用いられている。後者としては、堀川・砂村¹⁰²⁾や宇多・橋本¹⁰³⁾等の試みがあるが、画像の色調が底質条件や水中の浮遊物、気泡の混入等に影響される点が問題である。

(4) 水質調査法

a) 調査の対象となる水質と関連因子

河口部の力学的現象に最も大きな影響を与える水質項目は塩分であり、他には水温や浮遊物の濃度等が密度の変化を通して流れに影響する。水質調査においては、水質分布構造の決定因子までも含めた観測測定を行う必要があるが、実際にはすべての因子を詳細に測定するのは困難であるので、最も重要な因子を予測して臨むことになる。

b) 現地観測の方法

① 非正常現象の観測

密度界面を有しない河口部の場合は、通常の水質計や流速計を用い、いくつかの点で数時間おきに観測すれば現象がほぼ把握できる。しかし、緩混合や弱混合の河口部にはこれでは不十分なことが多い。特に緩混合の場合には、超音波測深機による界面観測が不可能に近いことが調査を一層困難にしているが、観測領域は比較的短距離であるため数地点を絞って定地観測を行えば、潮汐周期の流速や水質の変動を把握できる¹⁰⁴⁾。

これに対し弱混合型の河川では、定常流に近い流況になっており、超音波測深機による界面測定や各種自記記録計の使用が有効であって、観測例もきわめて多い。たとえば吉田・谷藤¹⁰⁵⁾は、低水時の天塩川河口水系で大規模な総合的観測を実施した。また、非正常現象の1つとして重要な界面変動の観測には、ステップ式界面計¹⁰⁶⁾や連続追尾式測定法¹⁰⁷⁾等も工夫されている。

② 界面破壊現象の観測

界面破壊は河口部で海水と河川水とが混合する最初の段階であり、その機構解明は古くからの重要課題である。水平距離にして数十 cm を越す領域にわたる界面破壊であれば超音波測深機による観測が有効である¹⁰⁸⁾、¹⁰⁹⁾。界面破壊現象をさらに詳細に調べるために、界面を色素で可視化し、水中カメラで観測する方法も試みられている¹¹⁰⁾。

③ 河口流出水の拡散域の観測

海域に拡散する河川水の水質分布構造については、水質計や流速計を用いた観測が主になされてきた。河口の近傍における観測は、当分は従来の方法により実施せざるを得ないが、沖合に拡散した河川水についてはリモートセンシング法¹¹¹⁾が有効であり、将来は拡散水観測法の主流となるであろう。ただし、拡散過程を力学的に把握するためには、乱れをも含む流速や流況、およびいくつかの測点での鉛直構造データ等をも取得することが肝要である。

参 考 文 献

- 1) Hansen, D. V. and Rattray, M. Jr. : New dimensions in estuarine classification, *Limnol. Oceanog.*, Vol. 11, 1966.
- 2) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究, 土木研究所資料, 第 1537 号, 1979.
- 3) Einstein, H. A. and Krone, R. B. : Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water, *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, No. 4, 1962.
- 4) Einstein, H. A. and Krone, R. B. : Estuarine sediment transport patterns, *Proc. ASCE*, Vol. 87, No. HY 2, 1961.
- 5) Kendrick, M. P. : Siltation problems in relation to the Thames barrier, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A 272, 1972.
- 6) 大坪国順：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第 42 号, 1983.
- 7) Gordon, C. M. : Sediment entrainment and suspension in a turbulent tidal flow, *Marine Geol.*, Vol. 18, 1975.
- 8) 馬場洋二・岩井国臣：感潮部河道における浮遊物質の移動特性について, 第 24 回水理講演会論文集, 1980.
- 9) Lepetit, J. P. and Davesine, M. : Dynamics of silt in estuary, residual current or flocculation which prevails?, *Proc. 17th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1980.
- 10) Harrison, A. J. M. and Owen, M. W. : Siltation of fine sediments in estuaries, *Proc. 14th Congress IAHR*, Paris, D 1, 1971.
- 11) Wang, D. P. : Two-dimensional branching salt intrusion model, *Proc. ASCE*, Vol. 109, No. WW 1, 1983.
- 12) 岩佐義朗・井上和也・田中 靖：河口感潮域の流れと拡散の数値シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第 25 号, B-2, 1982.
- 13) Stommel, H. and Farmer, H. G. : Abrupt change in width in two-layer open channel flow, *J. Marine Research*, Vol. 11, No. 2, 1952.
- 14) 須賀堯三・高橋 晃：河口流出に関する実測に基づく考察, 第 24 回海岸工学講演会論文集, 1977.
- 15) 柏村正和・吉田静男：河口二成層の流れの構造解析, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 16) 福岡捷二・福岡祐介・守屋祥一・新庄高久：河口密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件, 土木学会論文報告集, 第 327 号, 1982.
- 17) 柏村正和・吉田静男：河口の flow pattern について, 第

- 12 回水理講演会講演集, 1968.
- 18) 福岡捷二・福島祐介・守屋祥一: 河口密度流の界面形状と拡がりに関する実験, 第 35 回年次学術講演会講演概要集, 第 II 部, 1980.
- 19) Özoy, E. and Ünlüata, Ü.: Ebb-tidal flow characteristics near inlets, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1982.
- 20) 柏村正和・吉田静男: 潮汐による河口の flow pattern の変化, 第 19 回海岸工学講演会論文集, 1972.
- 21) 中村重久: 高潮に伴う河口付近の流れについて, 日本海洋学会誌, 第 23 回第 4 号, 1967.
- 22) Wright, L. D., Thom, B. G. and Higgins, R. J.: Wave influence on river-mouth depositional process, *Estuarine and Coastal Marine Science II*, 1980.
- 23) Wright, L. D. and Coleman, J. M.: Mississippi river mouth process; effluent dynamics and morphologic development, *J. Geol.*, Vol. 82, 1974.
- 24) 須賀堯三: 非定常河口流出と内部ジャンプ渦, 第 28 回海岸工学講演会論文集, 1981.
- 25) 吉田静男: 弱混合河口二層流の界面破壊, 第 27 回水理講演会論文集, 1983.
- 26) 大西外明・田中総太郎: 二成層密度流における多重フロント現象の観測とそれに基づく連行量算定法, 第 27 回海岸工学講演会論文集, 1980.
- 27) Whitham, G. B.: *Linear and Nonlinear Waves*, Wiley-Interscience, 1973.
- 28) Christoffersen, J. B.: Current depth refraction of dissipative water waves, Ser. Paper No. 30, Inst. Hydrodyn. & Hydr. Eng., Tech. Univ. Denmark, 1982.
- 29) Peregrine, D. H.: Interaction of water waves and currents, *Advances in Applied Mech.*, Vol. 16, 1976.
- 30) 加藤 始: 波と流れとの相互干渉, 1978 年度水工学夏期研修会講義集, 1978.
- 31) Jonsson, I. G. and Wang, J. D.: Interaction between waves and currents, Proc. 12th Coastal Eng. Conf., 1970.
- 32) Jonsson, I. G. and Wang, J. D.: Current-depth refraction of water waves, Series Paper No. 18, Inst. Hydrodyn. & Hydr. Eng., Tech. Univ. Denmark, 1978.
- 33) 浜田徳一・加藤 始: 流れの中の有限振幅波の計算, 第 10 回海岸工学講演会講演集, 1963.
- 34) 佐藤道郎: 不等流を越る波の波高変化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 242 号, 1975.
- 35) 加藤 始: 対数分布の吹送流に対する波速の計算, 土木学会論文集, 239 号, 1975.
- 36) Dalrymple, R. A.: Water waves on a bilinear shear current, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., 1974.
- 37) Jonsson, I. G., Brink-Kjaer, O. and Thomas, G. P.: Wave action and set-down for waves on a shear current, *J. Fluid Mech.*, Vol. 87, 1978.
- 38) Kemp, P. H. and Simons, R. R.: The interaction between waves and a turbulent current waves propagating with the current, *J. Fluid Mech.*, Vol. 116, 1982.
- 39) Dalrymple, R. A.: Finite amplitude waves on a linear shear current, *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 1974.
- 40) 堺 茂樹・佐伯 浩・尾崎 晃: 一樣流を伴う有限振幅波理論の適用性, 第 30 回海岸工学講演会論文集, 1983.
- 41) 黄 煌輝・郭 金棟: 流れの中における Stokes 波の shoaling について, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 42) 土屋義人・安田孝志: 一樣流を伴う有限振幅波の理論, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 43) Kjaer, O. B.: Gravity waves on a current, Series Paper 12, Inst. Hydrodyn. & Hydr. Eng., Tech. Univ. Denmark, 1976.
- 44) Iwagaki, Y., Sakai, T., Tsuda, T. and Oka, Y.: Wave refraction and wave height variation due to current, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 27, 1977.
- 45) Grant, W. D. and Madsen, O. S.: Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. Geophys. Res.* Vol. 84, 1979.
- 46) Tanaka, H. and Shuto, N.: Friction coefficient for a wave-current coexistent system, *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 24, 1981.
- 47) 田中 仁・首藤伸夫: 波・流れ共存場の抵抗則と境界層の領域区分, 土木学会論文集, 342 号, 1984.
- 48) Madsen, O. S. and Grant, W. D.: Sediment transport in the coastal environment, R. M. Parsons Lab., M. I. T., Rep. No. 209, 1976.
- 49) 金子 新: A study of sand ripples generated under oscillatory flow, 九州大学学位論文, 1981.
- 50) Shibayama, T. and Horikawa, K.: Laboratory study on sediment transport mechanism due to wave action, 土木学会論文報告集, 296 号, 1980.
- 51) 山下俊彦・沢本正樹・秋山義信・山崎泰助: 波動場での砂粒子の移動確率と掃流砂量に関する研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, 1983.
- 52) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司: シート・フロー状態の底質移動に関する研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, 1980.
- 53) 山本晃一: 河口断面形状について, 第 19 回水理講演会論文集, 1975.
- 54) 山本晃一: 河口処理論 (1)——主に河口砂州を持つ河川の場合, 土木研究所資料, 第 1394 号, 1978.
- 55) 堀川清司・砂村継夫: 千葉県屏風ヶ浦の海岸侵食について (2), 第 17 回海岸工学講演会論文集, 1970.
- 56) Chang, H. H.: Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans, Proc. ASCE, Vol. 108, No. HY 11, 1982.
- 57) Grijm, W.: Theoretical forms of shorelines, Proc. 7th Coastal Eng. Conf., 1960.
- 58) Bakker, W. T. and Edelman, T.: The coastline of river-deltas, Proc. 9th Coastal Eng. Conf., 1964.
- 59) Tsuchiya, Y. and Yasuda, T.: Mathematical models for predicting shoreline change of deltas, Proc. ASCE, J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Div., (投稿中).
- 60) Komar, P. D.: Computer models of delta growth due to sediment input from rivers and longshore transport, *Geol. Soc. American Bull.*, Vol. 84, 1973.

- 61) 橋本 宏：河口部海岸線の変化特性，土木技術資料，17-12，1975。
- 62) 佐藤清一：河口閉塞とその防止策について——神戸川における河口処理の一例，第2回海岸工学講演会講演集，1955。
- 63) 本間 仁・堀川清司・影山正樹・鮮千 澈：相模川河口について，第8回海岸工学講演会講演集，1961。
- 64) 野田英明：河口閉塞と漂砂，1974年度水工学夏期研修会講義集，B，1974。
- 65) 野田英明：河口閉塞に関する二，三の実験，京都大学防災研究所年報，第10号B，1967。
- 66) 鮎川 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回年次学術講演会講演概要集，1972。
- 67) O'Brien, M. P. : Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts, Proc. 10th Coastal Eng. Conf., 1966。
- 68) 吉高益男・島田米夫：河口の平衡断面積について，第14回海岸工学講演会講演集，1970。
- 69) 榎木 亨：河口閉塞にともなう河道内水位の変化について，第15回海岸工学講演会講演集，1968。
- 70) 山本晃一：河口の断面特性，第23回海岸工学講演会論文集，1976。
- 71) 中村 充・佐々木泰雄：河口滞砂における掃流砂関数の検討，第14回水理講演会講演集，1970。
- 72) 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，1980。
- 73) 宇多高明：新しい海浜変形モデルによる河口砂州の変形予測，土木学会論文報告集，322号，1982。
- 74) 榎木 亨・小船浩二：河口水位変化に及ぼす導流堤の効果について，第16回海岸工学講演会講演集，1969。
- 75) 須賀堯三・松村圭二・浜谷武治・高橋 隆：全国河川河口閉塞資料の検討（その2），土木研究所資料，第267号，1970。
- 76) 豊島 修：海の側から河口を見る，海岸，Vol.21，1981。
- 77) 建設省土木研究所：手取川河口処理に関する水理的検討，土木研究所資料，第1069号，1975。
- 78) 榎木 亨：漂砂と海岸侵食，森北出版，1982。
- 79) 豊島 修：河口処理をみる，海岸，Vol.23，1983。
- 80) 大和川河口部港湾埋没対策技術研究会：大和川河口部港湾埋没対策調査報告書，大阪府港湾課，1982。
- 81) Nishimura, J. K. and Lau, L. S. : Structure for automatic opening of closed stream mouths, Shore and Beaches, Vol.47, No.4, 1979。
- 82) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究，土木研究所資料，第1573号，1979。
- 83) 須賀堯三：河川における塩水くさびと内部渦の特性，第23回水理講演会論文集，1979。
- 84) 石崎勝義・井戸康雄・矢沢聖一：堤内地への塩水侵入の実態と機構について，第36回建設省技術研究会講演概要，河川部門，1982。
- 85) 村岡浩爾：流れによる底泥浮上と水質との関連，第18回水理講演会論文集，1974。
- 86) 柏谷 衛・村上 健：河床底泥の成分と酸素吸収速度，第26回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅱ，1971。
- 87) 須賀堯三・山田三郎：河道内波浪遡上と水理実験，土木技術資料，Vol.13, No.12, 1971。
- 88) 富永正照・山口高志・須賀堯三・鶴木和夫・高橋 隆：久慈川河口水理模型実験報告書（Ⅱ），土木研究所資料，第631号，1971。
- 89) 松村圭二：淀川消波工模型実験報告書（その2），土木研究所資料，第446号，1969。
- 90) 富永正照・九津見生哲：太田川高潮対策模型実験報告書，第748号，1972。
- 91) 室田 明：水理観測における規模の評価に関する研究報告書，土木学会水理委員会，1971。
- 92) 建設省河川局：改訂建設省河川砂防技術基準（案），調査編，日本河川協会，1977。
- 93) 運輸省港湾局：港湾調査指針，日本港湾協会，1971。
- 94) 服部昌太郎：最近の現地観測とその成果について，1981年度水工学夏期研修会講義集，B，1981。
- 95) 土屋義人・吉岡 洋・棚橋輝彦・市川雅史・土子良治：超音波式流速計による長期潮流観測について，第30回海岸工学講演会論文集，1983。
- 96) Grant, H. L., Stewart, R. W. and Moilliet, A. : Turbulence spectra from a tidal channel, J. Fluid Mech., Vol.12, 1962。
- 97) 田城徳雄・吉田静男・満沢巨彦：河口二層流における乱流構造の観測，第28回水理講演会論文集，1984。
- 98) 佐々木民雄：海浜流系の現地観測，1978年度水工学夏期研修会講義集，B，1978。
- 99) 田中 仁・首藤伸夫：鮫川河口部の水理現象に関する現地観測，第28回海岸工学講演会論文集，1981。
- 100) 須賀堯三・高橋 晃：河口流出に関する実測に基づく考察，第24回海岸工学講演会論文集，1977。
- 101) 鷺見栄一：二層型超音波流速計の測定結果について，公害資源研究所報，Vol.4, No.1, 1974。
- 102) 堀川清司・砂村継夫：可視領域リモートセンシングによる海岸環境の計測，第23回海岸工学講演会論文集，1976。
- 103) 宇多高明・橋本 宏：リモートセンシングによる海底地形・海浜流の同時観測，第24回水理講演会論文集，1980。
- 104) 上原忠保・岩崎敏夫：小河川感潮部地域における侵入塩分の挙動に関する研究，第27回水理講演会論文集，1983。
- 105) 吉田静男・谷藤康造：天塩川河口二層流と潮汐，第28回水理講演会論文集，1984。
- 106) 大谷守正・西條淳夫・八鞆 功：2層流界面計の試作と非定常界面変動の観測，第28回水理講演会論文集，1984。
- 107) 柏村正和・吉田静男：天塩川の河口密度流，第23回海岸工学講演会論文集，1976。
- 108) 吉田静男：弱混合二層流の界面破壊，第27回水理講演会論文集，1983。
- 109) 中野 渉・遠藤 浩・八鞆 功：短周期界面波における非線形現象の発生条件，第28回水理講演会論文集，1984。
- 110) 吉田静男・谷藤康造・田城徳雄・西田修三：弱混合河口二層流の特性，第26回水理講演会論文集，1982。
- 111) 大西外明・須山 哲・村上龍一：ランドセットデータを導入した本州周辺の河川水拡散状態の研究（1），第28回水理講演会論文集，1984。