

河口の分類と水理特性

Classification of River-mouth and its Characteristics

宇都宮大学 正員 須賀 堯三 K. Suga

1 はじめに

近年、河口付近の土地の高度利用が多くの場合急速に促進しているが、河口部の改修は、相対的にみて遅れている。洪水水位を低下させ、内水被害を軽減させることは、準技術的には適切な改修を行うことにより可能となる。また、大規模デルタにおいて河道の安定をはかり、土地のいっそうの有効利用を可能ならしめ、水環境を改善することも急務と考えられる。

ここでは、大小さまざまな河口部地域をとりあげ、デルタを含めた河口の成因および河口の発達過程について考察を行い、河道との基本的な相違点を明確にして、多種多様の河口に関する従来の分類を再整理・補足し、それぞれのカテゴリーに属する河口の一般的な水理特性について検討を行う。そして、河口部の計画に際しての基本条件を与えることを目標に、従来の技術経験に基づき、かつ発展させて、巨視的な立場から実際面に即した河口の検討手法について考察を行う。

2 河口における各種の水理現象の関連性と河口分類の検討方法

現実の河口を対象として対策を策定する立場からみると、解決すべき水理現象は多岐にわたる。その主要なものを列挙すれば次のようである。a)デルタの発達、b)デルタ内水路の性状、c)デルタ内水路の変動・遷移、d)シルティング、e)洪水時の水位上昇量、f)河口テラスの形成、g)河口砂州の発達（高さ、幅、長さ、位置）と変動・変化（河口砂州の河道内押し込み）、h)開口部位置の変化と開口部幅・水深、i)河口砂州のフラッシュと洪水時河口水位、j)河口閉塞と平常時河川水位、k)海水の侵入、l)高潮と波浪の侵入、m)砂州の発達と飛砂、n)河口部における局所洗掘（流れと波）、o)沿岸地形変化（岸沖方向、汀線方向）。ただし、以上の諸現象の基礎となる水理現象についてはここでは取り扱わない。これらの水理現象は、多くの場合それぞれに独立して存在するのではなく、各々関係を有しつつ、有機的に機能を分担し、しかもその機能は常に変化と変動を伴いながら、全体としての河口現象を構成していると考えられる。そして、その内容が河口ごとに異なっているので、適切な分類を行って、それぞれのグループ毎に支配的な現象を抽出し、比較検討を行うことは、意義あることと思われる。

また、河口部の水理現象に関連する水理項目は、川に関する水理項目と海に関する水理項目とに大別されるが、これらの関係は図-1に示すようである。すなわち、河口部の水理現象は、本来川の現象や海の現象とは異なったものであるが、時間的にみて、川の水理現象が卓越する期間、海の水理現象が卓越する期間、および両者の勢力が均衡する期間とに分けられ、それらは河川のスケールによっても異なるであろう。そこに錯綜性と多様性がみられる。図-1では、これらの特性が、川の条件と現象及び海の条件と現象によって分類されることを示唆している。例えば、図-1において、川の条件と現象の枠に、先に挙げた河川のスケールがある。海の現象のスケールは河川に対して基本的には、独立と考えても良いとし、河口の分類をまず河川のスケールによって行うとした従来の考え方はこれに該当する。

なお、主要な水理項目として河川に属するものには次の各項目が該当する。a)洪水流量・洪水期間、b)平常時の流量、c)流速、d)上流からの排出土砂量とその粒径。また、海岸に属するものには次の各項目が該当する。a)波（流れとの干渉）、b)沿岸漂砂、c)海底勾配、d)底質の粒径、e)潮位変動、f)入退潮流、g)沿岸流、h)海水による密度効果、i)沖積海岸（漂砂海岸）の延長と河口位置。これらの水理項目は複数作用して上記の水理現象を構成する。図-1は、このような水理項目によって構成される水理現象を支配する要因とその要因の間の関係を求めたものである。

河口現象の特徴は、その多様性と複雑さにあり、それ故に河口処理等の実際面においては技術経験を格別に要重しているところであるが、そのためには合理的な分類が必要である。ここでは、図-1に示す関係を河口分類の基礎とし、各カテゴリーに属する河口現象については、前述のような水理項目と水理現象の内容を、初期の考察段階においては全てとりあげ、その後関係の少ないものや効果の小さいものから消去していくかたちで、合理性を求める方法で検討を行っている。

【参考】 従来の河口分類

- a) 河川の尺度；大河川・中河川・小河川
- b) 平面形状；直流型・偏流型・遮へい型
- c) 海岸の条件；漂砂海岸(端部、中央部)・岩礁帯
- d) 人工構造物；導流堤(片側、両側)・暗渠・構造物なし

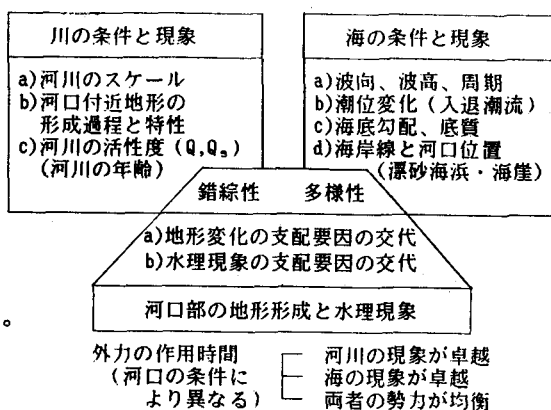


図-1 河川現象と川および海の現象の関係

3 河口部の地形形成の成因と発達に関する基本事項

河川の特徴は河川の年齢に相当程度支配されていることを述べた。河川の年齢の効果は、土砂に関する現象の歴史的な集約結果と現時点における土砂現象の活性度の2点に大別される。河口も河川の一部であるから、河川の年齢との関係は当然ある。しかし、海の条件としての水期における海水面の昇降の影響は、河口部の地形形成にとって決定的ともいえるほど重大であったと考えられる。参考のため水期の概要にふれる。

新生代第4紀の200万年間には数回の水期と間水期の繰り返しがあったが、現在の河口に最も影響を与えているのは、約2万年前に最盛期を迎えたとされるウルム水期である。これは、最終水期であり、かつ規模が大きく海水面は現在より100～140m低かったとされる。数値に幅があるのは誤差も含まれているが、地域による差が大きいからである。その原因は大別して次の4項目である。

- a) 厚い大陸水床の融解に伴い、荷重が解放されたために生じる地殻均衡的な隆起(500/1万年)とその周縁域
- b) 水深にして120mの海水量の増加による海洋底の沈降と大陸縁辺部の隆起(5～6m) ① 沈降
- c) 地殻変動や地震活動の活発な地域におけるテクトニックな地殻変動(5m/1000年)
- d) 侵食・堆積等による地形変化(一部地盤沈下も存在する)

最終水期の水床は2～1.8万年前に最大となったが、温暖化による急速な融解により6千年前には北米と北欧の大陸水床はほぼ完全に消失した。海水面はそれに伴い上昇し、この時期に現在の海面高度に達した。この間の平均上昇速度は約1cm/年である。最近1万年間の変化をみると、前半の4千年間は引きつずき単調にやはり約1cm/年の速度で上昇した。しかし、後半では約5千年前の縄文海進期(2千年間)には約3m上昇、約2.5千年前には、約2m低下というように、相対的にみて海面安定期であった。

河口部の地形形成に与える水期の影響を考えるにあたって、重要なことは、海水面が回復する過程において、河口部に輸送される土砂量とその粒径(山岳部からの土砂、河道侵食によって生産された土砂、海岸からの生産土砂)およびその土砂の堆積の仕方(地形)である。したがって、河口のパターンを支配する主要な項目は次のようである。

- a) 水床の有無と水床が存在する場合の水床の規模(融水時の河道の発達、河道侵食と表面侵食による生産土砂)
- b) 河口部に運搬された土砂の集積(湾、内海、外洋による相違)と周辺条件 ② 砂量
- c) 河川の年齢(水床の融解による一時的な土砂生産以外の基本的な流出土砂の現象に支配的一現時点の活性度、また河川の年齢は山岳部の高さに関与しており、積水深にも関係)
- d) 流域の規模と河川のスケール(海の波と潮位等の外力は、大スケールでは相対的には大同小異)

4 河口部の地形形成過程の推定

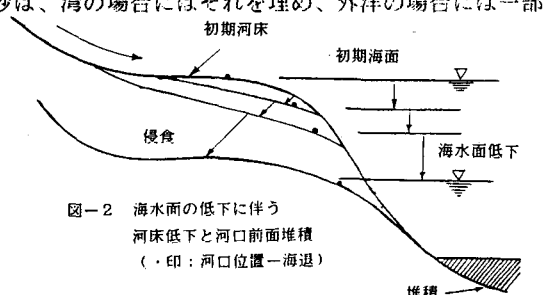
一般に、湾は土砂で埋まり、岬の台地や丘陵は侵食されて侵食台となる。その結果、海水面の安定が継続する限り、海岸線は一様化する。第4紀の水期は寒暖を繰り返しているが、その度毎に河口と海岸線は変化してきたものと考えられる。しかし、現在の河口部の地形形成に関しては最新のウルム水期の効果が卓越しており、この間の変形過程を考慮することが重要であることはあきらかである。

まず、寒冷化が進み着水が行われ水床が発達し海水位の低下が行われると、それについて河口部付近より河床低下が始まり、それが上流に伝播する。河道侵食により生産された土砂は、いったん河口前面に堆積する。その量に関連する事項は表一に示すようであり、水床が発達する場合には微量であるが、水床が発達しない場合には、河川の年齢の効果のほか、河川下流部の河床勾配と河床材料（これは河川のスケールに係る）による影響が大きい。河口前面に堆積した土砂は、湾の場合にはそれを埋め、外洋の場合には一部漂砂となって海岸線沿いに、一部は沖に輸送される。

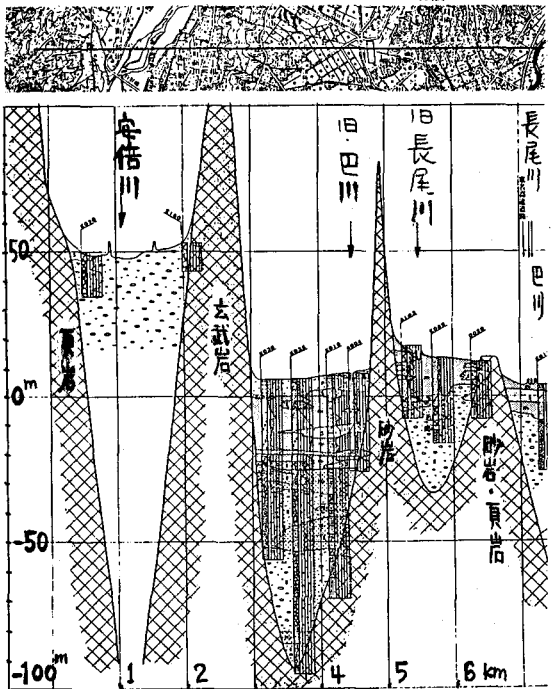
図一2は河口付近において水床が発達していない場合の海水位低下に伴う河口付近の河床低下および河口前面における土砂堆積について縦断的にみたものである。河口位置の前進（海退）は海底勾配が大きい場合は小さい。河床低下が生じた河道の両岸には河岸段丘が発達する。図一3は静岡県安倍川と巴川の基岩形状と後の堆砂の状況を示す。また、茨城県の久慈川と新川でも約60m下に現河道より大規模な水路が存在していることが確認されている。いずれの河川においても同様の状況になっているものと考えられる。次に解水期には水位上昇と海進作用があった。このとき、溺れ谷ができ、開折の進んだ山地はリアス式海岸となり、河口部は入江となる可能性がある。しかし、河川からの流出土砂及び海崖を生産源とする漂砂の量が多く、河口付近にそれらが堆積する場合には、河道を埋め、さらに海部に陸地を伸延させることがある。とくに、大規模の水床の融解が行われるときには、表面侵食による土砂生産と河道の発達・侵食に伴う土砂生産があり、解水の期間内に河口前面にはそれに見合う堆積がみられたものと考えられる。なお、河口の伸延量は海部の深さに関係があり、汀線方向への漂砂の移動量は波等の海の条件と底質による。

5 河口の分類

河口部において生じた現象の集約結果および現在の活性度に応じた分類を考える。ただし、この両者の間



図一2 海水面の低下に伴う河床低下と河口前面堆積（・印：河口位置—海退）



図一3 水期の安倍川と巴川

表一1 寒冷期における河口付近の地形変化

流域の水床	上流からの供給土砂量（河川の年齢）			120mの海水位低下に対する影響河道長（勾配・土砂）				地形変化	
	古	若	新	1/300 砂利	1/3000 砂	1/1万 粗砂	1/2万 細砂	流域	河口・海岸部
発達 微	微小 小～（中）	なし 多	（条件による） （スケールによる）	微小 36km	微小 360km	微小 1200km	微小 2400km	なし 段丘発達	海底勾配大につき海退量は小 河床勾配に応じた土砂量が支配的

表-2 水期の状況と河川の年齢による河口の分類

2万年前の状況		2万年前～6千年前の運動		6千年間の河口部の変化（河川の年齢による分類）		
流域	河口部	流域	河口部	古（古・中生層）	若（第4期の隆起）	新（活火山・大崩壊）
水床あり （河道の発達微小） 水床なし （河道発達・洪水有）	湾 外洋 溝 外洋	水河運動活性化 融水・河道発達・侵食による土砂生産 （現在と基本的には同様） （現在と基本的には同様）	フヨルド発生 大量の土砂堆積 堆積・海進 岬は侵食（波食台）	フヨルド発達 （若干侵食） （水浅小、河口前進） （沖積海岸）	大規模フヨルド 浅い海 おぼれ谷埋没 沖積海岸	「大量土砂の河口 への到達は河川 のスケールによ る」

表-3 河川スケールによる河口水理量の位置づけ

流域面積のオーダー	川幅のオーダー	河口部底質	水路勾配 $1/i_0$	洪水波形	$\partial H/\partial t$	砂州高	水深	砂州変動速度	タイムスケール（平常時）
10^2 $10^3 \sim 10^4$ 10^6 (km^2)	$10 \sim 10^2$ (m) $10^2 \sim 10^3$ $10^3 \sim 10^4$	砂利～砂 砂～シルト シルト～粘土	$3 \times 10^2 \sim 10^3$ $3 \times 10^3 \sim 10^4$ 2×10^4	数時間 数日間 年間一山	大 中 小 極小	高 中 低	小 中 大	最大 中 極小	分 時間 日～週 (時間) (時間) (時間)

には密接な関係がある。

河口における現象の概念を説明する図-1の関係を参照すると、河口の分類を行うための主要素は先の4項目である。これらの項目の効果については、それぞれ独立に作用するのではなく互に関連を有していることの内容を考察することが重要である。

表-2は水期における水床の効果について、海水面の上昇期と安定期とに分けて、河口部変化の特徴をまとめたものである。

表-3は河川のスケールとして、日本の中小河川、日本の大河川、および大陸の河川をとりあげ、それぞれの河口部河道の底質、砂州規模、砂州変動速度およびタイムスケール等の概略のオーダーを示し、スケールによる違いを概念的に表したものである。水期において水床の発達がみられる流域を流れる河川の場合も、河川のスケールの効果が重要な要素となっている。これは、表-1に見られるように、河川の勾配によって侵食に基づく一時的な河口への排出土砂量とその粒径が支配され、河口地形の発達が特徴づけられることを意味する。河口に対する河川の年齢の効果は河川の中・上流部に対するものと異なり、流出土砂の活性度として最近の6千年間の海水位の安定期の河口部の地形形成の運動に反映されている。これは、河川の年齢による土砂堆積の歴史的な集約結果が、河口部では海水位の大幅な昇降によって無為に帰しており、その後の解水期前半の海水位の急上昇期に河口部は新期に埋戻され、現地形の原型が形成されているためである。次に、海に関する現象の条件としては、波・潮位変化・海水の密度効果と粘土質細粒の沈積効果・海底地形および海底の底質などがあげられる。これらは、河川の現象の規模が大きい場合には、河口現象を特徴づける支配要因とはなりにくいが、河川の規模が小さくなるにしたがい、その効果が現れてくる。また、地形については、河口部前面への排出土砂の損失の少ない湾と散失がある外洋とに分けて考える必要がある。外洋の場合には、海崖と沖積海浜とに分け、後者の場合には河口位置の海崖からの距離が、特に小規模の河川の場合には汀線変動の影響を強く受けるので重要となる。

表-4は河口地形を十年オーダーの時間尺度でみたとき大雑把に分類したものである。個々の河口についてみると、2つ以上のパターンに属するものもあるが、前述の4項目の効果を考慮すると、それぞれのパターンの特徴を一層鮮明にすることができる。その際に、補足すべき事項として次の5項目がある（除人工要）。

- 現時点における河口排出土砂量と粒径（解水期と現時点の相違）
- 沖積海部の状況一発達中、海部水深が大きい（潮れ谷を含む）伸延停止、土砂量の減少に伴う侵食
- 砂州の性状一微細砂によるラグーン、細砂による自然堤防帯、砂による砂州、砂礫による扇状河口
- 河口部河道のセグメント一直接水路（分岐水路）、蛇行水路（規則、強制、不規則、網状蛇行）、（砂丘の発達）
- 変動特性と原因一方向変化、変動幅、平衡一stochastics 性質を示す排出土砂、漂砂の方向変化

表-4 河口形状のパターン（人工制御を除く）

名称	条件
円弧状砂州 鳥趾型三角州 流路変遷型 ラグーン型 急勾配海岸型 露岸接合型 位置変動型 砂州変動型	発達停止後の変形、漂砂と排出土砂の調和 自然堤防（多量の砂分） 大規模デルタ（水期の一時的土砂と経常的土砂） 溝の埋没 海底の沈降、おぼれ谷、発達に限界 漂砂方向、汀線変化、砂丘の発達 漂砂と流れにより河口位置が変動 河道セグメントの効果、波向の変化

表一五 河口形状のパターンと実例

河川名	河口形状分類	水路底質	記事
ミシシッピ川	鳥趾型三角州	砂質シルト	自然堤防の幅10km・比高3～5m、水路幅1km・水深30m、河道の台地
ポー川	鳥趾型三角州	砂質シルト	自然堤防4本、うち3川先端部に鳥 水路、(現在干拓)。 侵食幅85km
ライン川	円弧状砂州	シルト(砂)	過去の三角州の突出部は現在円弧状砂州(土砂減少・地盤沈下・波の作用)
小びつ川(千葉)	円弧状砂州	砂	河口砂州の発達と浜堤の伸延、それに伴う河口位置の移動(海面安定期)
オリノコ川	流路変更型	シルト(粘土)	北側に直線状分岐水路密度小(古)、南側にて大(新)
ガンジス川	流路変更型	シルト(粘土)	デルタ上流部にて水路密度小(1部蛇行)、下流部にて直線状分岐水路密度大
マラカイボ	ラグーン型	シルト(砂)	漂砂によるラグーンの発達、内海存在のため入退潮流大
黒部川	急勾配海岸型	砂・砂利	砂州伸延の限界、扇状地内の流路変遷(河口位置の変化)に伴う汀線変化
富士川	急勾配海岸型	砂・砂利	河口排出土砂量の変化に伴う突型三角州の変動が敏感(スケールにより波の影響
利根川	露岸接着型	シルト・砂	砂丘の発達にともない、河口位置の固定が行われ、安定化
渚滑川(林ヶ)	位置変動型	砂	季節による漂砂の移動方向の変化に伴う開口部位置の周期的変化
黄河	(砂州変動型)	シルト	分岐水路なし、排出土砂量(5km ² /年の土地誕生)、干潮時河口完全閉塞
荒川(羽越)	砂州変動型	砂・砂利	15～30km上流にて水深1m、上汐時に州が水没・順流、局所変動有り
石狩川	砂州変動型	砂・シルト	大洪水の直後に砂州発達、年経過に伴い縮小しつつ河道側へ移動 融雪洪水により河口前面に浅瀬が発達、これは夏にかけて消失

6 実例に基づく考察

実例を通じて河口の成因と性状について考察を行う。表一五は表一四の河口形状パターンに実例をあてはめたものである。図一四はミシシッピ川デルタを示す。氷床で覆われた台地は解氷期に侵食され、その土砂が河口デルタを形成した。鳥趾状三角州はアルプスから南下するポー川等にもみられる。共通点を挙げる。

a) 解氷期以降大量の土砂流出があった

b) シルト・粘土質が多く、デルタ(流水に対する耐侵食性)を形成する一方、砂分も多く自然堤防が発達

c) 鳥趾水路はデルタ先端部で発生(ミシシッピ川では500年前に分岐開始)、自然堤防が十分に発達、先端ではシルト・粘土が付近の海底勾配を小さくし波の影響小、水深大(分岐水路の発生条件・生存条件)

d) 現時点においても、砂分の供給があり、沈下に伴う自然堤防の弱体化を防止している

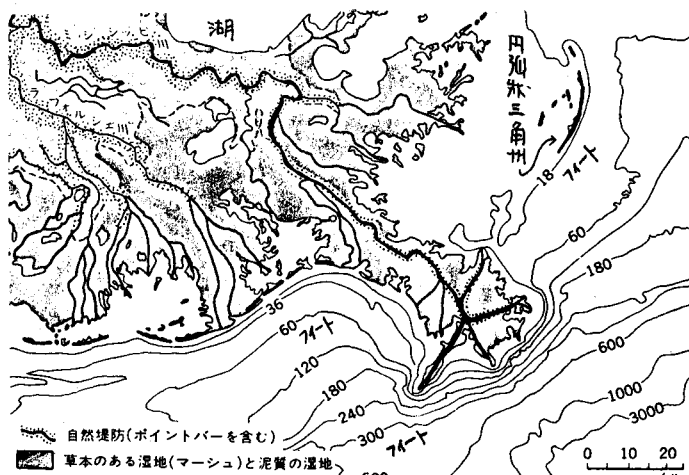
これと似た条件下にあるライン川で鳥趾水路が顕著でない理由は上記c)、d)にある。なお、図一四右上には2800～1400年前に発達した三角州が本流の変更後、時間と共に変形し、現在円弧状砂州として残っている様子を示す。大時間尺度において定常的な土砂流出があったと考えられるガンジス川とオリノコ川では、河川のスケールが大きく、かつ河道侵食量はわずかであるから、河口部底質に砂分が少なく、そのため多くの分岐水路が発達している。両川の相違は表一五のようである。水路の密度が小さいことは年代的に古く、わずかな砂分が堆積して埋められていくことを意味している。オリノコ川デルタでは、主流水路が北から南へ順次遷移しているが、水路延長はいずれも同様である。これに対してガンジス川では、海岸線方向に並んだそれぞれの水路がほぼ一様に海部の沖方向に伸延していると判断され、この限りにおいてオリノコ川より砂分の供給が少ないと推定される。これらの分岐水路群は、時間の経過と共に上流の古い水路から統廃合が行われ、砂分の堆積位置の流下に伴って、強制蛇行水路が上流より発達し、その下流において規則蛇行がみられるようになってきているものと推察される。黄河の場合に、河川のスケールが大きいにも拘らず分岐水路が発達しない理由は、排出土砂量が特に多く、水深に対し潮位変動が大きいためと考えられる。そのため、自流量の割に流路幅が広く水深が小さい状態で直線状に流下するのであり、分岐水路の長期的な生存は考えられない。

河口部において分岐水路が発達する場合、その水路が直線状になる理由は、水路の伸延過程にあり、流れは密度効果により2次元的なブルーム状になること、および順流時の流速が大きいことであろう。そして、出来上がった水路が維持される理由は、シルト・粘土により構成されているので耐侵食性が大きく、砂分が少ないので水路に交互砂州の発達がなく、流れの2次元性が維持されているためと考えられる。また、流路が2俣に分岐するのは、デルタの成長過程の中で水路が伸延し、水路の伸延過程において前面の砂州形成により分岐するものであり、上流の自然堤防地帯の下流域において発生、成長する分岐水路とは本質を異にする。分岐条件である砂州の発達は、潮位変動とそれに伴う入退潮流による侵食に耐え、かつ出水期に消失し

ないことが条件である。

次に、砂州変動型と位置変動型では、河川の現象のスケールが海の現象のスケールに見合った状態、あるいはそれ以下となると運動の活性化が生じる。表一五には、主原因として漂砂の移動方向、潮位変動、大洪水時の大量の土砂排出、融雪出水に伴う周期的な土砂排出の場合の河口現象の例をあげた。この場合の基本事項は、河川と海崖からの供給土砂の総量と海部（沖、汀線方向）への損失量との差であり、その時間変化の効果が問題とされる。また、その平面分布についてはここでは対象としないが、河川のスケールが大きくなり、河道延長が短い場合には、河口位置における河道セグメント（上流から決まる）の効果は重要である。

最後に、水理量の効果をまとめておく。波は砂利・砂・シルト河川では主要外力であるが、シルト・粘土が主体となる大河川では無視しうる。また、大河川の洪水波形は一年周期であり、例えばオリノコデルタは年間1・2カ月間は水没する。河口部での流速は、潮位変動と海水の密度効果により、下流域一帯では河口において最大となる。なお、潮位変動量とその効果については、ここでは調査不十分である。



図一四 ミシシッピ川鳥趾型三角州 (Bernard & Leblanc 1965)

(下流より鳥趾部、直線的水路部、不規則蛇行、強制蛇行²⁾)

7 まとめ

河口を巨視的に捉えることは、河口理解の第一歩である。そこで、河口の発達過程と集約結果、および現時点の水理現象に関する理解を深めることを目標に、実態論的立場から考察を行い、次の結論を得た。

- 河口は河川の流末部であり、河川の一部であるが、河川とは歴史的背景を異にし、それが河口の特性に反映されている。その最大の背景要素は、ウルム氷期における海水面の昇降と水床の融解に伴う侵食土砂の一時的流出である。河川の年齢は、現時点における土砂の活性度として河口の特徴づけを行っている。
- 河口地形分類の支配的要因は、解水による土砂流出、河川のスケール、河川の年齢、および河口付近の地形と水理条件である。これらの要因を考慮して、表一四に示すような河口形状のパターンを定め、表一五に示す実測に基づいて、それぞれのパターンの特性について考察を行い、河口の成因、発達および現象に関する考え方に矛盾のないことを示すことができた。
- 河口の安定度は、河口のスケールや条件の変化量（土砂量とその粒径など）によって評価されるが、鳥趾水路の安定は排出土砂中の砂の量に左右されるなど、質的側面も重要な要因となっていると考えられる。
- 日本の河口のように、河川のスケールが小さく、そのために海の現象の効果を著しく受ける場合にも、このような考え方は、現象の理解を深め、対策案や安定度評価に関する合理的な検討手法と成り得ると考える。すなわち、今回従来の分類を再整理し、小スケールの河口の場合も大河川の河口を含めた全体の河口のなかで統一的な分類を行っているため、それぞれのカテゴリーに属する河口の特性の位置づけが以前より明確になっていると考えられる。また、人工要素の効果と悪影響（不安定化）についても、このような手法を応用することが得策となるであろう。

- [参考文献] 1) 須賀亮三：大規模河床形態の特性に及ぼす土砂条件の影響、水理講演会論文集 S62.2
2) 須賀亮三：大規模河床形態に関する考察 水理講演会論文集 S60.2