

河口問題と現地調査

須賀 堯 三

目 次

1 はじめに	3-4 河口付近の流れと堆砂
2 河口問題の概要	3-5 砂州のフラッシュ機構
2-1 河口閉塞によって生ずる問題点	3-6 導流堤の遮蔽効果
2-2 全国河口閉塞の状況と処理工の設置状況	3-7 河口処理工の検討方法
3 河口特性の解明と手順	4 現地観測
3-1 河口現象の分類とその概要	4-1 現地観測の必要性
3-2 河口現象着眼点	4-2 現地観測の内容
3-3 平常時砂州規模と開口部特性	5 おわりに

1 はじめに

川と海（湖）の接点付近が河口である。川と海における水と土砂の運動は異質のものであり、河口現象はそれぞれの勢力と過去の状況に左右される。河口部の幾何学的な形状の変化は、大別して短期的なものと長期的なものに分けられる。短期変動は、河川の規模や川と海における水理量にも関係してくるが、日本列島における一般的な河口部では、川幅および砂州高程度をそれぞれ水平および鉛直方向の尺度に選んだ場合に、日単位程度の、かなり早い変化がみられるのが普通である。いっぽう、長期変動は河川改修、海岸工事、流出条件および風や降雨の発生条件などに関係すると思われる。近年は、河川や海浜、ことに前者の変化の度合は急激である。また、河口部周辺の社会環境や経済環境の変化により、河口部における短期・長期の種々の現象が、あらたに重要な問題として浮びあがってくることも少くない。したがって、同じ現象でも問題とされる場合、されない場合、あるいはその程度も異なるわけで、河口問題はことに現地事情に立脚した広い視野で考察することが肝要であろう。現実には、河口処理工は相当多く行われてきているが、あらたに河口閉塞による被害が認められ、処理工の必要度が増大しているケースも多くなってきており、今後も河口処理に対する要請はますます増大するものと思われる。

河口閉塞現象は非常に複雑であり、処理対策も容易でない。まだ現象が十分系統だって説明される段階に至っておらず、数多く行われているすぐれた研究も、全体的にみて実用的には、断片的の域を脱しきっていないようである。現状においては、処理工の検討方法としては、水理計算、現地調査、類似河口処理工調査、現地試験、および模型実験などが考えられる。ところが、水理計算のモデル化は簡単ではなく、それだけの検討では不十分である。河口問題は一般的に論じることが困難なので、けっきょく、個々の河口についての現地調査、試験、あるいは模型実験が必要である。この場合に、現地調査資料が基礎となるものであるから、その重要性が認識される。

ここでは、実際の問題との関連を重視して、河口問題の系統的な取扱いを試み、現地調査を行なうにあたっての基礎的な背景とその問題点の解説を行なう。なお、河口問題に関連した報文としてこの水工シリーズにおいて、すでに富永¹⁾、吉高²⁾、および吉川³⁾などの詳細な評価すべき解説があ

るので、なるべく重複を避け、かつ現時点までの研究成果も実際問題にとくに関連の深い論文のみを参照するにとどめる。また、図および表の一部はページ数制限の都合で省略し、講習会当日スライドにて補足する予定である。

2 河口問題の概要

人間生活の活動に無関係な河口に問題はない。個々の河口において人が問題を認知する。問題発生認められた河口において、問題点を分析し、検討方針をかためた後に、定性的および定量的に調査・試験および研究を行って処理工法を決定する。施工途中および施工後の検討も必須であり、最初の問題の解決の程度および検討途中の予測に関する反省が欠かせない。河口現象は、河川と海の両方からの現象が重なり合い、関係し合って非常に複雑であるから、現段階においては、一般的な記述はほとんど断片的なものに過ぎず、個々の河口における研究が重要な意義を有してくる。処理工法に関する系統的な研究は十分とはいえず、失敗・成功を重ねて、少しずつ進歩してきているというのが実情であろう。この章においては、根本的には以上のような実際上の立場を尊重し、河口問題の分析とその概要について述べる。

2-1 河口閉塞によって生ずる問題点

河口閉塞によって生ずる問題点は、大別して治水、利水（航路維持、および漁業を含む）、および環境問題等に分けられる。また、問題の発生の仕方として、現時点のものと、将来の計画に伴ない発生するものがある。

河口閉塞による社会・経済的影響を具体的に分類すると、①堤内地への浸水、内水の排除困難②舟運困難、③漁獲高の減少、および④環境問題等が挙げられる。また、河口処理工を行って閉塞が解消したために発生する問題点も考慮しておかなければならない。それらは、⑤治水上の問題として、河道延長の影響、波浪の浸入、高潮の浸入、および海岸浸蝕、⑥利水上の問題として、塩水濃度の上昇、平水位と地下水位の低下、および漁業への影響、および⑦河川・海岸構造物の維持などである。河口問題としては、これらの全ての問題が同時に解決されなければならない。以上の各項目について、具体的な影響、主要原因、および採用可能処理工法などをとりまとめると、表一1のようになるであろう。なお、採用可能な処理工法としては、表一1に示されるものの他に、堤防の嵩上げ、放水路、ダム築造、遊水池、ポンプ排水、河道堀削、漂砂止めの突堤、あるいは離岸堤なども広義の河口処理の対象になると考えられるが、ここでは河口を閉塞している砂州を直接処理する工法のみに限定している。

2-2 全国河口閉塞状況と処理工の設置状況

日本の多くの河口は、改修上の重要なポイントになっている。いなかの極く小さな河口まで、ブロックなどで導流堤が設けられたりしている例をみると、地域関係者の苦勞のほどがしのばれる。著者ら⁴⁾⁵⁾による全国563河口資料による調査結果では、表一3にみられるように、約8割は河口に何んらかの構造物が設けられている。そして、ほとんど全ての河口において、程度の差こそあれ、河口閉塞による弊害が認められている。これらの資料は、河口規模は大小混合されているが、無作為抽出ではなく、調査年度に数年の巾があり、調査時期もまちまち（秋～冬が多い）であり、また入江など地域の状況を考慮していない。しかしながら、この資料によっておおよその見当はつけられるであろう。

処理工なしの河口を地域的にみると、北海道と九州は約8割に達し、瀬戸内海ではさらに多いが、本州の太平洋側、日本海側、および四国では5割以下であって、よく処理工が設けられている。処理工の内容は堤防の延長のような汀線までの簡単なものから、沖に長く突出した導流堤ま

解決すべき問題	影響	現象	原因	処理工法
河川閉塞による問題 ①堤内への浸水 排水困難等に対する影響	洪水時の氾濫 平常時の内水排除の困難、不能	河内への水位上昇	河口の閉塞 河口部流積の不足分	導流堤(治水目的) 人工閉削 暗渠 水門
②舟運に対する影響	貨物量の減少	河口部への航路維持の困難、不能	河口の閉塞 河口部航路水深、幅の不足 航路位置の不安定	導流堤(舟運目的) 人工閉削
③漁業に対する影響	漁獲量の減少	魚の遡上量の減少 水質の汚染 採集の困難、危険性の増大	河口の閉塞 河口部流積の不足分 河口部位置の不安定	導流堤(舟運目的) 人工閉削 水門
④環境の悪化	社会、経済環境の悪化	水質の汚染 高水数利用不能	河口部流積不足	導流堤 人工閉削
⑤利水に対する影響	取水困難、不能	取水地奥に於ける塩水浸透の上昇 取水値の低下 地下水値の低下	河口部に於ける砂州の消滅 河口幅、水深の増大	取水奥の移設 表層取水 取水堰の設置
⑥河川、海岸構造物に対する影響	構造物の破損、不到壊腐蝕	波浪の侵入 塩水の侵入	河口部に於ける砂州の消滅 河口幅、水深の増大	構造物の移設 構造物の補強(鉄筋コンクリート)
⑦治水に対する影響	洪水時の氾濫 海岸浸食 波浪の侵入 高潮の侵入	水位の上昇 海岸線の悪化 波浪の侵入 高潮の侵入	河川の延長 導流堤による漂流量の悪化 河口部、水深の増大	河川流削 形状損失を小さくする 冬堤、離岸堤 高潮堤 消液工

表一1 河口閉塞によって生じる問題と処理対策

	北海道		本州			四国		九州			計
	太平洋	日本海	太平洋	日本海	瀬戸内	太平洋	瀬戸内	太平洋	日本海	瀬戸内	
a. アンケート資料	14	14	22	70	63	3	3	31	13	32	265
b. 航測資料	57	19	40	50		6	22	8	33	7	242
c. 踏査資料			56								56
計	71	33	118	120	63	9	25	39	46	39	563
	104		301			34		124			

(注) 航測資料は a. c を除く。

表-2 全国調査河口数と地域分布

	北海道	本州			四国	九州	計
		太平洋	日本海	瀬戸内			
a. 片側構造物	12	30	27	2	10	17	98
b. 内側構造物	11	42	34		8	10	105
c. 河口に右の存在	4	10	11	1	2	12	40
d. 河口港の存在	10	17	29		13	22	91
e. 構造物なし	81	46	59	61	16	97	360
計 a+b+c+d+e	104	118	120	63	34	124	563

表-3 導流堤等の構造物設置河口数

で各種のものが存在する。図-1 は処理工の効果判定の一つとして、調査時点における開口巾を比較したものである。もとより、処理工の効果の判定は、処理工設置前後の比較によらなければならない。開口巾としては平均値または卓越値をとる必要がある。また、開口巾に影響する各種要因のうち、流れと波、および過去の状況が卓越するものと考えられるが、図-1 では流れに係る河川規模を表わす一つの指標として計画流量を用いている。このように、図-1 は現象を十分に説明するものではないが、平均的なものと解釈して考察すれば、構造物が設置されている河口の方が、やや開口巾が大きいようにも見られるが、その傾向が顕著であるとはいえないようである。

つぎに、閉塞度を地域的にみると、太平洋側では日本海側よりやや閉塞度が大きいようである。瀬戸内海では50%以上の開口河川が53%、反対に10%以下の河口が9%で最も閉塞度が小さい。瀬戸内海では波の勢力が弱いことのほか、砂質海岸が少なく、その延長も短いことも理由の一つと考えられる。また地域状況により河口港として利用されているケースも多く、港の存在する場合はかなりよく維持されていることがうかがえる。

以上のように、砂州の堆積による閉塞現象が全国的に多くみられる。このことは河川の大小を問わず、導流堤等による処理対策がなされている場合でも、閉塞ぎみの河口が多いといえる。処理工設置後も問題が残されているということは、河口処理工についての明確な指針が確立していない現在、大規模な処理工の実施に困難が伴うので、試行的実施例が多いことを物語るものであろう。

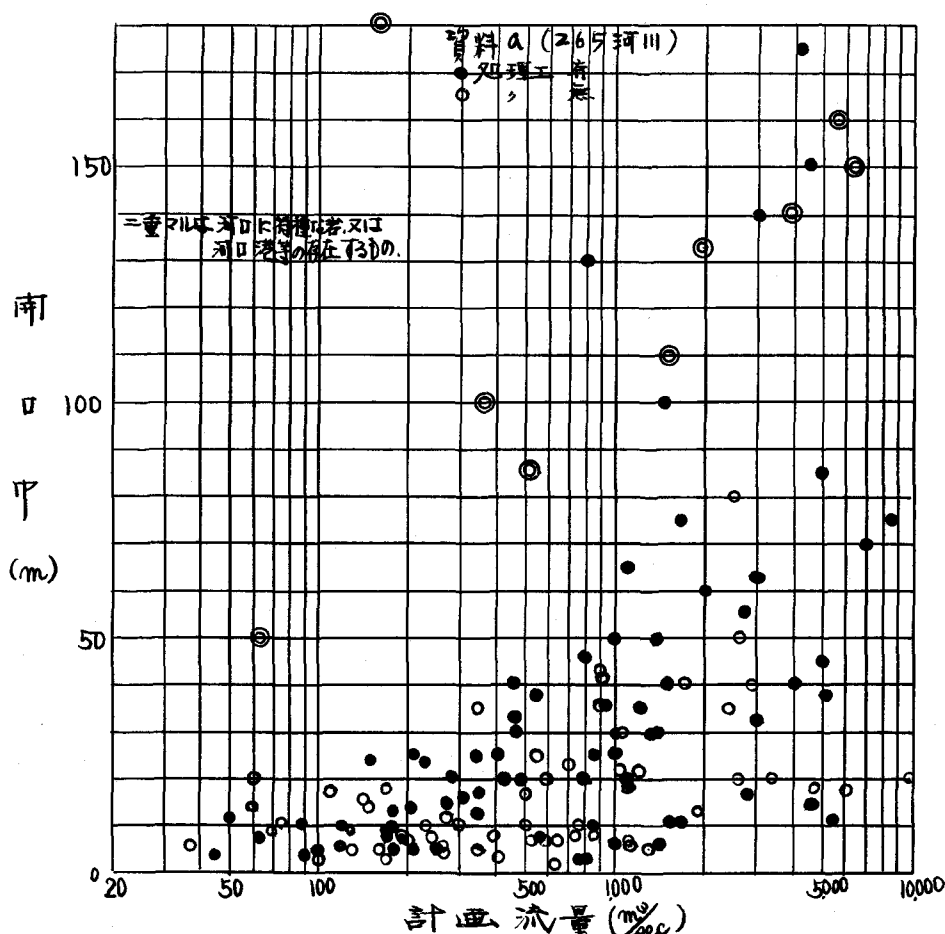


図-1 平水時開口幅と計画高水流量の関係

3 河口特性の解明と手順

河口関連の研究課題は多岐にわたり、系統だてて現象を説明すべく体系づけることは困難であるが、その問題は古くより注目され、数多くの基礎的研究、現地調査、試験および模型実験などが行なわれてきた。ちなみに、毎年、土木学会年次講演会では4編前後、海岸工学講演会では3編前後の河口関連論文が発表され、また、1971年に開催された国際水理学会（I.A.H.R.）ではテーマの一つに河口における土砂問題がとりあげられて、28編の論文が寄せられた。いっぽう、処理工の実施例は表-3からも判断されるように、大変な数にのぼっている。したがって、河口特性は相当程度究明されているといえる。ここで、河口特性の概要を解説することは目的の範囲を逸脱すると思われるが、河口問題を考察するにあたって最小必要な事柄について、とくに三次元的な問題についてふれておく必要が感じられる。

3-1 河口現象の分類とその概要

河口問題の解明が容易でないことの原因に、種々の河口が存在し、重大な影響を与える要因の数が多く、相互関係が複雑であり、あるいはその調査が容易でないことなどが挙げられる。

単純に、河口現象に重大な影響をおよぼす要因は水理量と底質に分けられる。水理量には、河

川流量（洪水および渇水流量），潮差，および波浪（波高，周期および波向き）があり，底質には河口部および海部の底質粒径，土砂の締め具合と植物の生育状況，および岩の存在とその状況などが考慮される。底質は流送特性，および透水性に一つの条件を与え，透水性は完全閉塞の可能性および打ち上げ高さ，砂州高をも支配する。河口が長さを限定された砂質海岸のどこに位置するかも重要問題で，河口開口部位置の安定性および処理工法に差異が生じる。また，砂丘地帯などの小河川では飛砂が問題となる河口も存在し，河川および海部における改修工事あるいは砂利の採取などが重大な影響をおよぼすこともある。

以上のような主要因によって，普通河口は，①河川流型，②波動流型，および③潮流型に分けられる。これは水理量による分類で，①は流量あるいは勾配が大きく，したがって河口における掃流力が大きくて，主として流量の変化のみによって河口開口部特性が定められるもの，②は潮差が小さく，河川流量およびその変化も小さくて，波の影響が支配的なもの，および③は潮汐による入退潮量により河口が主として維持されるものである。これらは当然のことながら，独立に存在することは少く，おのおの因子が相互に関係する。また，河口形状による分類として，④偏流型，⑤直流型，および⑥遮蔽型，などに分けられ，その内容は図-2のようである。全国大小の河口を以上の分類にあてはめることは容易ではないが，変動を無視し，しいて調査時点の河口状況によって平均的にみても表-4のようである。これは当然のことながら，およその傾

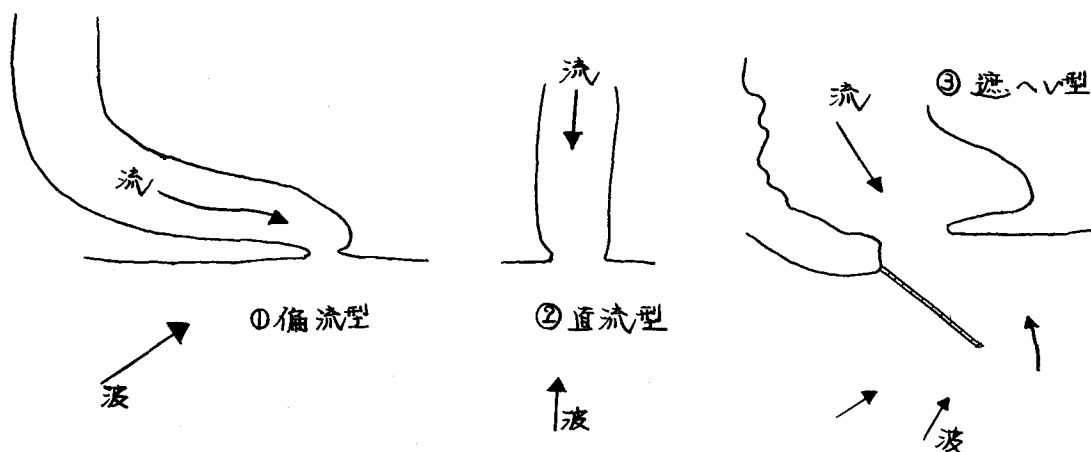


図-2 河口形状による分類

向を知るにとどまる。まず，水理量による分類では，河川規模が大きくなれば流量によって，また小河川でも勾配が非常に大きければ掃流力によって河口部がある程度維持される。通常の中・小河川では波の影響が支配的となることが多い。表-4で瀬戸内海の波浪が支配的の14河川は大阪湾など瀬戸内海の端の方で流入している河川である。潮汐の影響の判定はまぎらわしいものが含まれているが，日本海側では非常に大規模な河川に限られる。区別のつかないものには構造物などが存在するために判断が困難とされるものが含まれている。つぎに，形状による分類では，偏流型が案外多いことを示しているが，これは②の波浪が支配的なものとある程度対応するであろう。直流型は①と③の流量および潮汐による入退潮が支配的なものとの対応がよいと思われる。直流型と遮蔽型とは砂州がほぼ川巾の $\frac{1}{2}$ 以上伸延しているか否かで判定したが，遮蔽型には構造物や天然の岩しょうなどの影響も含まれている。これは，水理量による分類で区別のつかないものに属するものが多い。全体的にみて，表-4から日本の河口には種々様々なものが混在していることが判断され，このような単純な分類においても河口問題の多様性が認識される。河口は改

		本 州			北海道	四国 (瀬戸内海側)	九州	計
		日本海	太平洋	瀬戸内海 (四国・香川)				
水 理 量 に よ る 分 類	① Qが支配的	23	5	14	9	1	9	61
	② 波浪が支配的	16	6	14	10	2	13	61
	③ 潮流による 入退潮が支配的	0	6	8	1		28	55
	④ 区別がつかない	30	7	2	8	3	31	88
	小計	69	24	57	28	6	81	265
形 状 に よ る 分 類	① 偏流型	27	35	24	33	2	19	140
	② 直流型	41	36	27	31	21	44	200
	③ 遮へい型	31	64	10	39	8	21	173
	④ 区別がつかない		5					5
	小計	99	140	61	103	31	84	518

上段はA資料(表-2参照)

下段は平面図のあるもののみ

{ a. 228
 b. 248
 c. 42

表-4 全国河口の分類

修工事等によって、人工的に変化が加えられつつあるが、土地利用は高度に発達し、河口環境を大きく変えることには相当の困難が伴うので、このような全国すう勢は将来ともある程度尊重されるであろう。

河口現象は見方を変えれば、またそれによる分類も可能であろう。すでにみてきたような実際上の問題点を解決する意図で個々の河口を眺めるときには、河川の規模、入退潮流、河口付近の地形状況、あるいは季節変動などに焦点が絞られてくるであろう。

一般に大河川では、河口付近の勾配が小さくて入退潮量が大きい。河口付近に接続する湖沼などの水面が存在するときは、河口流量はさらに大きくなる。渇水流量は減少する傾向にあるので入退潮流の意義は大きい。大河川では、洪水の出方は時間をかけてゆっくり出てくるのが普通である。このようなときには、砂州により急激に水位が上昇することはない。これに対し、中・小河川では、勾配は大きくても、渇水流量が小さいので閉塞傾向にあり、出水時には流量のピーク以前に、河口水位のピークが出現するのが普通である。この場合には、砂州の崩壊の仕方と流量ハイドログラフの立ち上りの部分が問題となる。もともと、近年は大河川においても計画流量の増大などにより、河口水位の低下および河口付近の形状損失の減少方法が大きな問題となってきたケースが多い。

いっぽう、全国の河口資料においてすでにみてきたように、地域的特性の存在することもみのがせない。潮差は、日本海側では0.2～0.4、太平洋側では0.6～1.5 m、および特殊な湾、たとえば有明海などは数メートルになる。渇水流量は地形・地質・降雨および植生のほかに、開発状況に大きく左右される。また、裏日本では中洪水で長時間継続する融雪出水があり、降雨量も

地域によって相違があり、出水の現われ方もまちまちである。波浪は日本海側では冬期の季節風が顕著であり、太平洋側では夏期の南方からのうねり、および台風による波浪などが大きな影響を与える。これに対し、内海や湾などでは波の影響が軽減される。このほかに岩などの影響が卓越している河口があり、海岸構造物（これにも地域特性が存在する）の影響などもみおとすことはできない。

河口現象に重大な影響を与える要素として、流量と波とを考えるならば、これらの量には季節特性があり、確率的表現も可能である。これらの相互作用の結果生じる河口現象について確率的考察をすることは容易ではないが、現実には河口現象には季節特性が存在するようであり、このような分類に基づいて考察を行なうことも必要であろう。とくに、汀線、海底勾配、および砂州規模の季節変動には興味深いものがあるように思える。

河口特性の季節変動には時間尺度に応じた変化がみられる。河口は出水によって砂州がフラッシュされれば、最大開口となるが、出水後は河口は、閉塞過程にある。この時期においては波と流れの勢力関係、および漂砂の供給量により閉塞速度が定まり、通常はかなりの変動がみられる。ある程度閉塞がすすみ、波と流れの勢力が均衡して、河口が安定すれば、それが平衡河口と呼ばれるべきものであろう。実際の河口問題を考察するときには、このような分類にしたがった捉え方も重要なものとなろう。

3-2 河口現象着眼点

各種要因とその相互作用により、河口現象にはさまざまな相が存在する。その相は時々刻々と変化し続けるものであるから、その形態の系統的な分析および組み立てを行なうことは容易でない。ここでは、実際問題を検討し、処理工法について考察する場合に、個々の河口において主として着眼点となる現象を取り出し、その主要な影響要素を列挙する。

河口を現地において眺める場合に、その河口の有する現在ならびに将来の問題点によって、当然見方は異なるが、一般的な河口現象の着眼点を挙げるならば表-5のようになるであろう。このほかに構造物や処理工関連で重要なものが存在するが、表-5では除いている。

河口現地においては、出水時とか波の非常に荒いときに遭遇することはなかなか大変なことであるが、このようなときの河口現象には非常に激しいものがあり、予想外の現象に驚かされることがある。たとえば、大淀川河口では通常高さ 4.5 m、巾 170 m 程度の大規模な砂州が発達しているが、S46台風19号の余波により、短時間に砂州の前面が大きく後退し、河川側の砂州背後に大量の砂が押し込まれたことが観察された。また、千葉県外房～福島県海岸では通常の場合でも粒径の細かい海岸では50m以上の汀線変動が観測されている。写真1の関根川河口（茨城県）における破壊された旧海岸堤はS45.8には砂上2m以上露出していたが、その後汀線の前進とともに砂中に姿をかくし、長い間完全に砂中に没していたものがS47.2（写真撮影時）に全部倒れてはいるが、再び砂上に出現した。その他、玉石でもフラッシュする洪水時の掃流力や、平均海面より2m以上の高所に玉石をのせる波の力など、自然の力の大きさに眼をみはるばかりである。

このような現象も、河口問題を考え、実際に処理方法について検討し、計画をたてる場合には見落とすことのできない重要な着眼点としなければならないであろう。

3-3 平常時砂州規模と開口部特性

平常時には、河口における現象として、波による砂州の発達（二次元および三次元）、汀線変化、開口部の偏位、開口巾および開口部水深などが注目される。

二次元的な砂州の発達に関しては、著者ら⁶⁾の実験によれば、①粒径および波の特性が一定で砕波点より海岸側を考えると、浸食型でも平衡状態が存在する。②浸食波でも長時間あてると

着 眼 河 口 量	主 要 影 響 因 子	備 考
開 口 巾 平 常 時 最 大	渾水流量（入退潮流を含む）、底質 波（有義波高、周期、波向、エネルギーの累計値） 洪水ハイドログラフ、潮位、砂州規模、底質、河道条件	流れ方、飛砂、構造物、人工要素 砂州のフラッシュ機構
河口水深および海部における堆砂	流れの三次元性、流出土砂量、粒径、フロキュレーション 波、安息角、河道条件、流量、塩水の侵入	流積、開口巾との関係
開 口 位 置 汀 線 方 向 河川軸方向	漂砂の方向（季節変動、海砂、河川砂）、順・逆流、（流況分 布）、汀線変化、蛇行（砂礫堆） 流出土砂量、漂砂量、汀線変化、波（侵食波と堆積波）	人工開削、フラッシュ位置、構造物 初期伸延方向（波が小さいと直角になる） 構造物
河 口 部 の 偏 移 と そ の 速 度	漂砂の方向、河川の蛇行、汀線変化、	構造物、砂州の履歴
砂 州 高 ， 砂 州 勾 配	潮位十うち上げ高、飛砂、堆積波と侵食波、粒径	三次元形状
汀 線 変 化	波、漂砂、底質	長期変化は別途考慮（経年変化）
波による砂州の発達と崩壊	波、潮位変化、粒径	二次元、三次元 荒天時、平天時
フ ラ ッ シ ュ 速 度	洪水ハイドログラフ、粒径、非平衡の流砂関数、河道条件、 潮位、砂州の非越流、側方侵食、一部越流、越流	波によるフラッシュもある
高 潮 と 波 浪 の 週 上	波の反射、回折、屈折、碎波、まさつ、河道のわん曲、 導流堤、水深	
塩 水 の 週 上	潮差、貯溜面積、砂州、河川勾配、流量	混合形態、週上距離
隣 接 河 口 特 性	河川規模（勾配、流量、川巾、粒径）、構造物、海浜状況、 波向	波はほぼ同一

表一5 水理上の河口現象着眼点（処理工関連を除く）

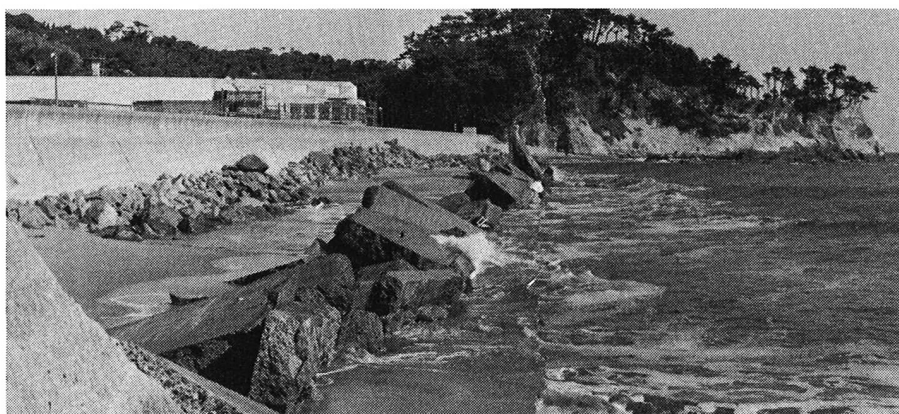


写真 1 関根川河口左岸旧海岸堤防
(S.47.2 撮影)

砂州が発生する。③初期水深が碎波水深以下であって砂が動けば、砂州の平衡形状に対する初期水深や初期海底勾配の影響はあまりない。④ただし、形状と砂の移動速度の関係により、砂州が平衡に達する時間は大いに異なる。⑤砂州高は波のうち上げ高とほぼ一致する。⑥堆積波の場合には、砂州高および砂州前面勾配は大きくなり、碎波点から砂州天端までの距離は短くなるが、侵食波の場合にはその反対になることなどが判明した。

実際の河口においては、このような二次元的な砂州の発達の可能性もあるが、多くは汀線と平行方向の漂砂が存在し、片側（長い時間尺度でみると、まれには両側）から伸びることが多い。この場合には、図-3のように砂州の縦断勾配により、砂州にうち上げられた砂を含んだ波が水路側岸へ横から流れ込むかたちをとる。このようにして河川流により海へ戻される砂の残りは砂州の伸長に寄与することとなる。鳥取県天神川では砂州の消長についてかなり短期毎に測定が行なわれている。河口位置は東方あるいは西方に激しく偏向して定まらない状態であったが、ほぼ汀線までの導流堤の設置により、導流堤間約 350 m の間におさまるようになった。しかし、砂州は河口部を大きく

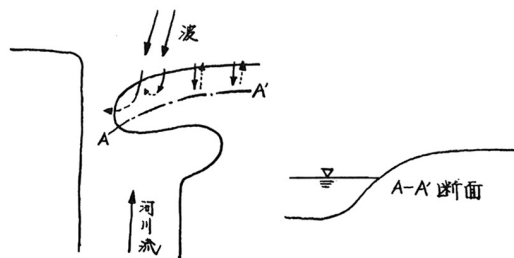


図-3 河口砂州の発達

塞ぎ、しかもその変動が激しい。表-6は砂州平面形の測定期間毎の1日当り平均砂州伸縮長さを示す。これによると12日間平均で最高20m/日(S. 44には最高37m/日)の伸延率を記録しており、三次元砂州の変動規模に驚かされる。

汀線変化にも二次元的なものと三次元的なものが存在する。二次元砂州の消長をみると、一般に堆積波では汀線の前進と勾配が急で高い砂州の発達がみられるが、侵食波では汀線の後退とゆるい勾配で低い砂州が河道の奥の方まで入り込むような現象がみられる。この傾向は粒径の細かい場合ほど顕著であり、著者らによる千葉県外房～福島県の観測結果では、ほぼ同一波浪条件の隣接河口で、1 mm以上の大きい粒径の海浜の変化があまりないのに対し、0.3 mm程度の海浜に

おいて約1年半の間に50m以上の汀線の変動と砂州高にして2m以上の変化が観測されている。もつとも、実際の海岸では種々の波が重なり合ひ、季節的な変動もあるうえ、侵食波および堆積波の区別にやや微妙なところもあつて、長い時間の総合された現象の結果として、たまたまこのように観測されたのであろう。また、汀線変化は沿岸方向の漂砂の分布と河川からの補給土砂量のバランスによって支配される面もあり、数々の研究が行なわれているがここではふれない。

河口開口部の偏位方向は、漂差の方向や河川における砂礫堆の流下などと関連する複雑な現象であり、これは導流堤工法などの処理工の計画に参考とされる。河道における交互砂州を形成する砂礫堆は、大きな急角度のわん曲部では固定されるが、通常極くわずかずつ下流に移動する。砂礫堆は低水路を固定し、大きな砂礫堆は出水時の流況にも影響を与える。したがって、河口において波による三次元砂州の勢力より、河川の流が優勢な場合には、河口開口部の偏位方向をも規制することがある。しかしながら多くの河口においては、漂砂の方向が支配的であり、漂砂量とその変動は個々の河口部の偏位と密接な関係にあると推定される。これは通常、方向別の波のエネルギーあるいは風向・風速の資料と関連づけられる。神戸川⁷⁾では、波の代りに日御崎における風の資料を用い、SSW~W方向とNNW~W方向の 5 m/s 以上(10 m/s 以上のものは2回に換算)の風速の日数を月毎に積算し、これと開口部の偏位方向とを比較したところ、定性的によい一致がみられ、定量的にも移動量と風力回数とがかなりよく対応した。

河口開口部、水深、および流積は非常に重要な問題である。これについては種々の研究が行なわれ、河川流量やタイダルプリズムと結びつけたもの、波と流量の両方を考慮したものなどがあり、すでにこの水工シリーズにおいて吉高²⁾および吉川³⁾の詳しい紹介があ

昭和年月日	
45.1.23	-11.8 (m)
31	+0.1
2.13	+6.0
21	-0.6
28	+3.2
3.9	-2.8
14	+4.4
30	-7.4
4.10	+2.5
22	-5.2
27	+2.1
5.4	-13.8
9	+2.4
19	-1.4
27	+3.6
6.8	-0.9
27	(-25.4)*
7.10	+0.5
8.8	-2.4
22	+0.2
9.28	-0.4
10.14	0.0
20	0.0
29	+9.0
11.14	-13.4
21	+6.7
12.5	+20.0
17	-5.0
23	

表16 一日当り砂州伸縮量(*人工開削のため) +は東向、-は西向 天神川S.45

る。

3-4 河口付近の流れと堆砂⁸⁾

河川からの排出土砂は国土保全上、海浜への補給土砂としてその適正量が要求される。しかしながら、近年はダム築造、砂防工事、あるいは砂利採取等により、河口まで流送される土砂量の減少度が著しいといわれる。いっぽう、最近のヘドロ公害に象徴される汚濁物質の堆積は深刻度を増し、河川の大小を問わず、全国的にその河口部の自然美がそこなわれつつある。これは水産あるいは観光上の問題にとどまらず、生活環境上の最重要問題の一つに挙げられよう。ここでは問題を考察するうえでの基礎資料を得ることを目標として、河口付近の水の流れ方と土砂の動きに注目してみたいと思う。

河口付近では、河川固有流のほか潮位変動に伴う入退潮流が加わり、さらに海水の侵入で密度流的な流れも生ずるなどきわめて複雑な形態をとる。また、河川の上流から送流されてきた土砂と漂砂が、流れと波および塩水の作用などにより、河口付近独特の運動をする。この付近の土砂の動きは一般に非常に激しく、季節的に河口部形状を変化させるので、それに伴って河口付近の流れのパターンも大きな影響を受けるのが通例である。河口から海部への流れのパターンは、流量、潮位変動、地形変化および風などの影響を受ける。また、流速分布は密度差の効果や混合状況によって、水深方向に顕著な変化がみられる場合が多い。

まず、潮位変動が小さくて弱混合型になっている場合の河口からの平時の流れについては、柏村ら^{9) 10)}は長年石狩川などで現地観測を行ない、実験検証を加えて興味ある二、三の特性を明らかにした。主なものを列挙すると次のようである。①上層の淡水流はくさび状の塩水を少しずつ自身の中へとり入れながら流下するが、河口をすぎると著しく塩分濃度を増し、かつ淡水厚は急激に減じて海上に拡がっていく。②淡水流速は河口を出てもすぐには減衰せず、むしろ一時加速される傾向にあり、やがてピークを過ぎてからゆっくりと減衰していく。石狩川では河口を過ぎて川幅の約 0.8 倍程度沖でその最大値を示した。この位置は淡水流の拡がりが少ないほど沖へ出るようである。③河口では内部フルード数が 1 になるといわれ、その点で *internal jump* の存在が理論的に予想されているが、実際には顕著な *jump* の形式ではなく、河口を通過するにしたがって淡水厚が次第に減少し、同時に下層塩水の混入がいつそう目立ってくるというような形態になっている。④塩水層の中に無流面があり、それより下層では流向が逆になっている。塩水くさびの存在する河口では表面流速は流量によってそれほど差異はないが、無流面深度は流量によって大きく変化する傾向がある。⑤表層流速は河口を出て一時加速されるが、塩分濃度は沖に向って急激に増大する。そして淡水厚の減少、および淡水流の巾の拡がりが見られ、このような密度流的推移の過程でのエネルギー損失が河口内におけるときより増大している。⑥河口横断方向の流速分布は、流量が大きくて噴流に近い状態であれば中央において最大値が生じ、流量が小さくてポテンシャル流に近い状態であれば両岸部付近において最大値が現われる。⑦石狩川における現地観測(昭和44年8月)の結果によれば、表面水にはみお筋に沿って淡水の主流があり、河口を出るにしたがって次第に塩水濃度を増す。しかしそれよりも左右両岸に向っての塩水濃度の増加が著しい。とくに、左岸先端付近では河口内にまで表層に海水が侵入している。このように河口内で横断方向に塩分がかなり異っているにもかかわらず、流速は両岸のごく一部を除いてほぼ一様である。それが、河口に達すると淡水の主流部よりも左岸先端の塩分を多く含んだ部分の方が流速が大きい。これは河口端部における一時加速現象に相当するものであり、他の資料においても同様の現象が認められた。⑧水面から 0.5 m の深度では、左岸先端の表面流にみられた一時加速の現象は当然なく、流速の最大は淡水主流に移っている。河口両端における一時

加速現象はポテンシャル流でも生じるが、淡水層の厚さが急激に減じ、それに伴って先端部の表層水が加速されると考えることもできよう。

つぎに、潮汐変動の大きい場合の流れは、以上のような弱混合の場合とは多少異った流れになると予想されるが、現段階では十分な知識が得られていない。しかし、緩混合の場合には弱混合に準じた取扱いが許されるであろう。潮汐変化に伴う入退潮流が生じる場合は、一般に順流と逆流とで流況が異なる。これは地形や混合の度合、および河川流の状況などによるものと思われる。

出水時には、河口において内部フルード数が1となる流量以上の場合には河口内に塩水が存在しないとして取扱うことが一般に許されているようである。出水時の流況が現地観測された例はあまりないようであるが、航空写真の撮影が行われた例はかなりあり、大淀川（S 39.9, S 43.9）吉野川（S 39.9），淀川（S 40.9），石狩川（S 41.4），阿武隈川（S 41.6），北上川（S 41.6），阿賀野川（S 41.9, S 44.8），最上川（S 42.8），五箇瀬川（S 43.9），新信濃川（S 44.8, 46.9），黒部川（S 44.8），利根川（S 46.9），および江戸川（S 46.9）などでは、表面流速分布の図化が行なわれ、または図化可能な状態である。航測結果によると、流況、表面流速分布、砂州フラッシュと射流発生の様子、浮遊砂の状況、海上における流れ、および波の様子などの推定に役立つことがわかり、興味深い。

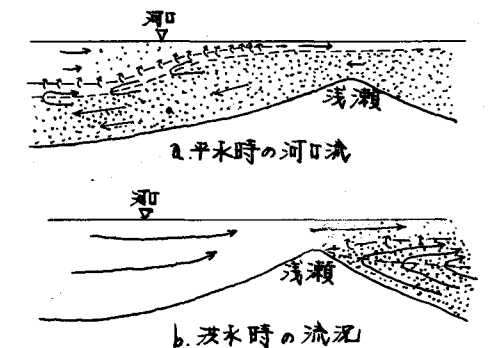
河口付近の土砂の運動は、波浪の影響は別としても、流れにおける潮汐流、二層流、およびフロキュレーションの影響を受ける。平野部を流下して海に注ぐ河川では、その排出土砂は河口部ではかなり細かくなっているのが通例である。流砂の型式として浮遊砂と掃流砂に大別されるが一般に浮遊砂は掃流砂に比して細かく、その量はオーダー的に多い。浮遊流砂量としてウォッシュロードまで含めると、 $0.1 \sim 0.06 \text{ mm}$ 以下のシルト分の浮遊流砂量 Q_s (m-sec単位) は、多くの日本の河川の場合、 $Q_s = (10^{-6} \sim 10^{-7}) Q^2$ で表わされる。¹¹⁾ここに Q は流量(m^3/S)である。一般に河川からの排出土砂量の多い河口部ではデルタが発達し、それが延長する傾向にある。このような場合には海の水深も小さくなるから波の影響が少なくなり、河口部における局所的な砂州の発達もあまりみられない。北海道あたりには河口部で流れが幾筋にも分かれ、乱流状態になって、小さなデルタを形成している河川がみられる。

河口から海に排出される土砂は、多くの平地河川の場合に、量的には細かいシルト分と考えてよいであろう。ところが、海では波による分級作用により、汀線と砕没点あたりの土砂の粒径が最大となり、細かい流砂は沖へ運ばれて一部が漂砂となるのであろう。

すでにみてきたように、出水時にはジェット流に近い状態で沖へ流れ出すが、洪水流量の多い河口沖（河口巾の4～5倍の所）には図-4⁹⁾のような浅瀬が生じて河口港の難点になっているといわれる。¹²⁾石狩川では河口の内側から沖に向って次第に浅くなり、600 mあたりに浅瀬が存在する。そして浅瀬を過ぎると急激に深くなる。これは融雪出水期に形成され夏期は大体そのままの形状で維持されると推察されている。⁹⁾

3-5 砂州のフラッシュ機構

砂州の存在によって、出水時に水位が上昇する。開口流積が小さいと、通常流量ピーク以前に河口水位のピークが現われることが多い。こ



(矢印は流向、点線は塩分、破線は無流面とみなす)

図-4 河口沖の浅瀬

とに中小河川ではその傾向が強く、流量ハイドログラフの立ち上りの部分の勾配が問題となる。また、河口付近では複雑な流況を呈し、非常に高速な流れは、構造物周辺などに極端な洗掘を伴う。いっぽうでは、多量の土砂が海部へ輸送され、主流部のかげに大きな堆積を残す。このような出水時における河口付近の現象は、水位、局所洗掘、および出水後の河口地形など、難解な問題を提供している。

砂州のフラッシュ現象は激しい河床変動を伴った不定流現象で、波のエネルギーは無視しうる。この場合、流量波形、潮位波形（射流が現われて下流水位に無関係となることも多い）、流砂関数、底質、および側方侵食機構を知り、その現象を把握することが理論的には可能となる。

河口には個々の特性が強く、一般的に論じることが困難であるが、検討の順にしたがって一瞥する。①既往の資料より得られた砂州変動特性において、あまり変動のない部分はよく縮っており、簡単にはフラッシュされないが、変動部は相当の大径砂でも容易にフラッシュされる。②砂州の存在する場合としない場合について不等流計算を行なうと、砂州のフラッシュ効果の概要を知ることができる。③射流時の流砂関数には浮遊流砂を考慮する必要がある。河口部では三次元流に伴う渦の発生があり、河床砂の舞い上がり機構を考察した非平衡状態を取扱かわないと十分でない。二次元的な砂州の崩壊の実験例はあるが、三次元的な現地観測例はあまりない。④河道が急で、砂州部だけ粒径が小さい場合、流量の増加に伴う流積の増大は、河床の低下によるよりも主として流路巾の増大によることがある。フラッシュの計算では、長方形断面、放物線、あるいは Lane の断面形などが用いられている。⑤砂州があまり大きく張り出していないときは一次元的な不定流時の河床変動計算で概略の推定が可能である。⑥砂州が大きく張り出している場合には、その先端部に上流からの補給砂がかなり集まり、この部分の流失までかなりの時間を要することがある。⑦砂州を越流しはじめると崩壊速度は大きくなる。

砂州のフラッシュ機構は一次元解析では現象を十分把握しえない場合が多い。三次性の強い問題の場合、特に砂州の三次元崩壊、水位上昇量、局所洗掘、あるいは堆砂などの一般的な特性の把握には移動床の模型実験がその威力を発揮する。なお、模型実験の精度を高め、再現性の確認のために、現地における出水時の砂州崩壊資料と水理資料とが必要である。

3-6 導流堤の遮蔽効果

河口処理の有力な工法に導流堤がある。導流堤の効果としては、局所的な波の変形、漂砂防止、砂の持ち込み量の減少、砂州発達防止、飛砂防止流路固定および低水路維持などがある。反対に、河道延長、波の反射（消波工）、汀線変化、および構造物の維持（波と洪水流による局所洗掘および沈下）などの問題がある。導流堤の規模として、長さ、高さ、透過度、片側・両側、および方向などがあり、以上の諸問題との関連において検討することになる。検討方法としては、模型実験および計算があるが、前者によるのが大部分である。

河口に導流堤が設置されている場合、外海の波浪は遮蔽域に入ってくると、回折、屈折、反射摩擦、碎波、および流れによる変形を受けながら砂州部に達する。砂州部においては、この波と河口流量により主として支配されるので、導流堤の規模・構造を種々仮定し、河口部に達する波浪を制御することにより、河口砂州の規模をも制御することができる。

3-7 河口処理工の検討方法

河口閉塞によって問題が発生している場合、調査の第一段階は問題の程度と原因究明である。処理工はその結果に基づき、河川や海の状況を考慮して案がたてられる。河口問題点および原因と処理工法についての一般的な関連は、すでに表-1 においてみてきたとおりであるが、個々の河口においては、その規模や社会経済環境の相違もあり、個々にその規模や内容に応じて、処理

工法は検討されなければならない。

処理工を検討する基本方針は、治水目的の場合は、河口水位が計画水位以下となるような処理工のうち最適なもの、また舟運目的の場合には、航行に必要な条件を満たすものを選ぶことであるが、同時に処理工を行ったために発生する問題（表－１参照）を解決できなくてはならない。各種処理工のうち、一例として、導流堤を検討する手順を示せば図－５のようになるであろう。この場合、導流堤の遮蔽効果（砂州規模）、出水時砂州のフラッシュ機構、平常時開口部特性、および開口部偏位方向などが問題となる。導流堤設計の手順は、図－５のフローチャートにしたがえば、最初に導流堤の遮蔽効果の検討によって、仮定した導流堤の規模および構造に応じて、河口部に形成される砂州規模、開口部水深、開口巾、位置、開口部流速、および波浪規模等が与えられる。つぎに、この砂州が河口に存在する場合、出水時における砂州のフラッシュ状況が検討される。これには、計画高水波形、河口水位、底質、および地形測量結果を与えて河道内水位が求められる。この水位を計画水位と比較して、仮定した導流堤の適否を決定する。いっぽう、舟運目的に対して、その河口部を航行する舟の規模、運行期間等から必要な河口部水深、巾、位置、流速および波浪規模等の下限あるいは上限が与えられる。これらの諸量を比較することによって、仮定した導流堤の妥当性が判断される。このようにして、最適と判断された導流堤は、経済的検討と現地事情を解決のうえ、現地施工に着手される。この種の工事の施工は、全計画を一度に行わず、一部ずつ徐々に、それによる影響をみながらすめ、修正の余地を残しておくのがこれまでの慣習である。このようにして処理工は施工中も、さらには竣工後も現地観測を行って検討がつけられることが望ましい。

以上のような検討方法は、原則として他の処理工法に対しても適用される。ただし、暗渠および水門等は一度に施工しなければならず、また人工開削では、開削後の波浪による砂州の復元日数などの、それぞれの特殊事情を当然考慮しなければならないであろう。

4 現地観測

河口現象に関する現地観測は、河川測量・観測のような歴史もなく、系統づけられたものでない。各河口において必要に迫られて、あるいは興味を持たれた場合に限って独自の方法で行なわれてきた。現地観測は内容多岐にわたり、観測上の困難も伴うものであるが、全国的にある一定水準以上のレベルに統一されることが望ましい。ここでは、その詳細にふれることはできないが、簡単に問題点の要約を試みる。

4－1 現地観測の必要性

河口には個性があり、変動が激しい。同じ河口は二つと存在せず、予測のつき難い現象が発生する。すでにみてきたような各種現象の経年変化および季節変化を知り、そのうえで原因究明がなされる。問題の内容と被害の状況調査も経済的な処理工法を検討するうえに不可欠である。将来への余裕を残した処理工を計画し、処理工施工後の現象の予測にも十分な長年にわたる事前調査が必要である。また、予測計算および模型実験にとって、その精度および信頼性を高めるためにも現地調査結果が基礎となり、処理工施工後の調査は検討技術の発展を促す。河口現地調査は危険を伴う大変な作業であるが、行なわなければならない。これは技術上および経済的にも必要なことであり、系統的に行なわれなければならないであろう。

4－2 現地観測の内容

河口現象は種々の要素が作用し合った結果として生じるものであるから、主要な要素についてはすべて調査することが肝要である。とくに波浪観測など海域での調査は危険と困難を伴うもの

調査項目		処理工法				
		導流堤 (印水防)	導流堤 (無導流堤)	人工開削	暗渠	水門
波浪	有義波の日平均頻度分布	○	○	△	○	△
	表向の日平均頻度分布	○	○	△	○	△
流量	平水時の日平均流量	○	○	○	○	○
	入退潮量	○	○	○		○
	出水時の毎時流量	○	○	○	○	○
水位	平水時の日平均水位	○	○	○	○	○
	出水時の毎時水位	○	○	○	○	○
潮位	平均潮位	○	○	○	○	○
	潮望平均干満潮位	○	○	○	○	○
	気象偏差	○		○	○	○
漂砂	沿岸漂砂の量および方向	○	○	○	○	△
底質	粗粒分布図	○	○	○	△	○
水質	水質の分布図	△	○	△	△	△
風向・風速	毎時の風向・風速	△	△	△	△	△
	異常気象時の風向・風速	△	△	△	△	△
河川・海岸 地形測量	等深線図(海域)	○	○		○	
	等高線図、縦断面図(海域)	○	○		△	
	汀線の経年変化図	○	○		○	○
	河道縦横断面図	○	○	○	○	○
河川部縦 横断面測量	砂州の消長を示す平面図、等高線	○	○	○	○	○
	平水時の河川部横断面図	○	○	○	○	○
	平水時の河川部縦断面図	○	○	○	○	○
	出水直後の河川部横断面図	○	○	○	○	○
	出水直後の河川部縦断面図	○	○	○	○	○
必要条件						
計画高水流量		○	○	○	○	○
計画高水位		○	○	○	○	○
計画河川水位		○	○	○	○	○
粗度係数(河道)		○	○	○	○	○
河川と航行する船舶に関する資料			○	○		
社会・経済環境調査		○	○	○	○	○
(注) ○ 印は調査必要項目。 △ 印は必要に応じて行はう。 係砂、流砂は原則として行わす。必要に応じて考慮するものとする。						

表一7 処理工法に対する必要調査項目

であるが、一面的な調査におわらないよう配慮しなければならない。

河口閉塞処理工法設計に必要な基礎資料の調査項目は表-7 のようである。この他にも、たとえば航空写真撮影など有用な資料となりうる調査はあるが、表-7 では必要最小限にとどめた。また、処理工設置後の調査、構造物関係の調査、塩分遡上調査、および河口における *sedimentation* の調査などについても除外した。

実際の調査を行なうにあたっては、調査位置・範囲、測定間隔、調査時期・期間、調査機器装置、調査・測量・観測方法、得られた資料の精度と補正方法、諸量の計算方法、図と表のまとめ方、他の諸量との相関・比較、および予算などについて明らかにしておかなければならないが、これらについては講習会当日その一部を補足する予定である。

5 おわりに

河口閉塞について現場問題を中心に、現象の概略を解説した。この中で河口現象の多様性の一端を紹介したつもりである。これらが現地観測の必要性和そのおおよその内容、および観測を行なうにあたっての基礎知識の一部として役立つことがあれば幸である。

現地河口において系統的に観測が行なわれ、解析がすすめられることにより、数多く行なわれている基礎研究とあいまって、さしも複雑な様相を呈する河口現象の解明がなされるであろう。また現在は河口問題に迫られながら、解決を先に延ばしているケースも多いと聞く。完全な現地観測に基づく *case study* により、水理上合理的にして、かつ経済的な処理工設置数の増大は、ただちに技術および学問の進歩につながるであろう。

河口現象に関する基礎研究も最近はかなり活潑になっている。これまでの集積は大変なものになる。今回はあまりに実際問題に片寄りすぎ、過去の研究成果のとりまとめは省略したが、河口現象解明の飛躍の時期にあたり、あらためてその必要性も痛感している。

おわりに、この解説において、現地における観測資料をかなり多く参照し、その一部を報告させていただいたが、関係各位の御苦勞に心底より敬意を表するものである。

〔 参 考 文 献 〕

- 1) 富永康照：河口処理について，土木学会水工シリーズ 1966
- 2) 吉高益男：河口安定，土木学会水工シリーズ 1968
- 3) 吉川秀夫：Estuaryの水理，土木学会水工シリーズ 1970
- 4) 須賀・松村・高橋：全国河口閉そく状況の実態と二・三の考察，土木学会年次講演会 1971
- 5) 須賀・佐久間・松村・浜谷・高橋・高安：全国河口閉塞資料の検討（その1～その4）
土木研究所資料 583, 627, 727, 728号, 1970, 70, 72, 72,
- 6) 須賀・松村・末吉：河口二次元砂州に関する実験的考察，土木学会年次講演会 1972（投稿予定）
- 7) 佐藤・岸：河口に関する研究（神戸川），土木研究所報告 94号 1946
- 8) 須賀堯三：河口付近の流れと堆砂の特性，土木技術資料 13-10, 1971
- 9) 柏村・吉田：河口の流れの構造(1)および(2)，土木学会海岸工学講演会 1968, 1969
- 10) 柏村・吉田：河口流の実態，土木学会海岸工学講演会 1970
- 11) 須賀堯三：浮遊流砂に関する雑考（その1），土木学会年次講演会 1967
- 12) Bates, C.C. & Freeman, J.C.Jr.: Inter-relations between jet behavior and hydraulic processes observed at deltac mouths and tidal inlets, Proc. 3rd Conf. on Coast. Eng., 1952