

建設省土木研究所

正員 須賀堯三

正員 山本晃一

1. はじめに

河口部に生ずる現象は非常に複雑である。この複雑さは河口部の合理的な河口処理計画を打ち立てることを妨げている。この原因は河道に海からの影響要素（波、漂砂、飛砂、海水）が加わるために地形変化の速度が激しく、それを予想し、計画の中に組み込むことに困難を覚えるからである。

しかし現実には河口があり、河口の状態をある一定の状況内に置きたいという欲求は、河口現象の法則性、因果性の認識を深め合目的、合理的な河口処理計画方法を追求することを要求する。それゆえ、今までにも多くの河口現象、河口処理工法に関する研究が行なわれ、成果をあげてきた。だが現実の河口は個々の河ごとに独特な相を持ち単純な基礎的研究では手が出ないことが多い。その原因としては、i)河口現象を支配する影響要素が多く、時間および距離のスケールが異なると影響要素が異なること。

ii)外力の変動性、非一様性および底質の非一様性、iii)作用の相互性（非線型性）、iv)河口が移動域にあり平衡概念が使えない河が多いこと、v)河口に対する欲求（計画目的）の多様性、vi)観測の困難さ等々があるからである¹⁾。実際に河口計画を立てる場合には、現地観測資料、他河川からの類推、水理計算、模型実験などを基にし、計画者の経験を加え総合的な判断が下される。

ここでは河口処理計画を立てる場合の一手段である河口模型実験の問題点と模型実験結果をどのように河口計画の中に位置づけるかを筆者らの職場で行なった模型実験を通じて述べてみたい。

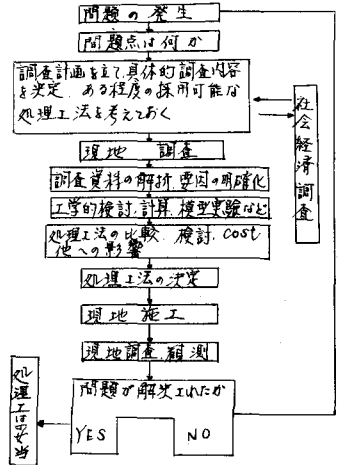
2 河口模型実験での検討項目と河口の特徴

河口模型実験によって明らかにし検討してほしいと望まれていることを述べると、

- i)高潮時の波浪の進入程度、波高分布、堤防へのはい上りを把握し、もって防潮計画を立てたい。
- ii)洪水時における河口部の水位を明らかにしてほしい。
- iii)河口砂州のフラッシュ程度、河口部の洪水時の河床高を明らかにしてほしい。
- iv)河口砂州の発生を防ぐため河口導流堤を計画しているが、どのような導流堤なら効果的か、また航路のための河口水深は維持できるか、
- v)河口部の浚渫計画が有るが、これは維持できるか、局所的な洗掘や堆積が生じるか等々である。この内i)の問題は固定床模型である程度解決できるが（木曾三川、大田川）、他の問題は河床、海床変化を伴った移動床実験でなければ検討しえない。

この問題の模型実験での検討は、今までの河道模型実験と異なった点が多々ある。その点を明らかにするには河口現象と河道の現象の違いをふまえておかなければならない。それらを簡単に述べると、
i)河口は波と流れの共存の場であり、その強さ、方向は刻々変動する。洪水時には河川流の強さが卓越し、波の作用をあまり考えなくても良いが、通常は波と河川流が共存し、複雑な流れを生じる。そ

図1. 河口計画の流れ



れに応じて河口部の地形変化は複雑に動き変動が激しく、外力の変化の積分の形で現われる。また外力の急変は河口地形を短時間に変えてしまうこともある。

ii) 河口はまた淡水と塩水の共存の場でもあり、密度流の効果の強い所である。この淡水と塩水の存在状態も、河川流、潮位、風の変化によって変動する。この塩水と淡水の存在は、河口部の地形変化、特に土砂の堆積場所、砂州の形成等に大きな影響をあたえる。

iii) 潮位の変動があること、この要素は河口最狭部断面などに影響をあたえる。太平洋側では変動が大きい、日本海側では小さい。

iv) 河口に存在する底質材料の供給源として、河からと海からを考えなければならない。また川砂と海砂では粒度分布が大きく変わることが多い。

これらの特徴を河口模型の中に全てくり込むことはできず、実験は、河口現象の一部、特殊化された場の中でしか行うことができない。この場合、河川ごとに影響要素の卓越性を把握し、実験条件を決め、無視したものの効果を常に頭に入れておく必要がある。

3 具体的実験例²⁾

ここでは具体的な実験例、主に最上川（この川は河口左岸に大きな河口砂州があり、冬期には波浪によって開口幅50m、春先の融雪出水（2000m³/s）によって200m前後の拡大をくりかえしている。この砂州のため、洪水時水位が上昇し危険であるため、導流堤工法および浚渫によって水位低下の計画がなされている。）を通じ、どのような考え方で実験を進めたか、また今後河口現象を解明する上で考えなければならない点を模型実験の結果をとおして述べてみよう。

○ 模型範囲および縮尺

模型対象範囲は河道部3.2Km（水位観測点を含み、河川蛇行の影響を考慮）海域は沖合1.5Km、汀線方向は、酒田港防波堤より1.2Kmとした。底質の波による移動限界水深はほぼこの中に入る。ただ汀線方向の長さは導流堤による汀線変化を見るのには小さすぎた。なお造波板は16m（現地約1000m）しかなく実際には実験できない。縮尺 $\frac{1}{60}$ とした。これより小縮尺にすると相似性や測定に問題を生ずる。河床材料は石炭粉（比重1.5、 $d_m = 0.021\text{ cm}$ ）を使用した。

○ 相似律

筆者らは海岸地形の波による変形は H_o/L_o , H_o/d or $\sqrt{gH_o}/W_o$, $S = (\sigma_s/\rho - 1)$ および初期形状などが支配すると考えている。^{2), 3)} ここで W_o は沈降速度、現地と模型は上述の無次元量を等しくすることが望ましい。しかし現地の海底砂の粒径は0.025cmであり汀線および河道内は0.075cmである。粒径を縮尺に合^Nわせて縮めると底質材料がシルトとなり種々の問題が生じるので手元にある材料として石炭粉を使用した。これを使うと $(\sqrt{gH_o}/W_o)r = 2.2$ となり、現地の方が浮遊砂の濃度分布が上下方向に均一になる。ここで r は現地スケール/模型スケールの意味である。ただし汀線付近は $(\sqrt{gH_o}/W_o)r = 1$ に近い。

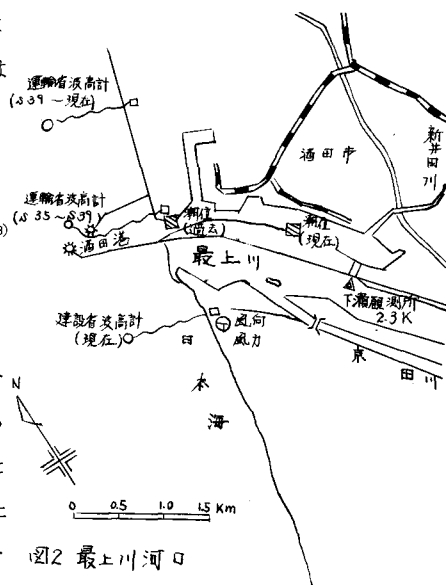


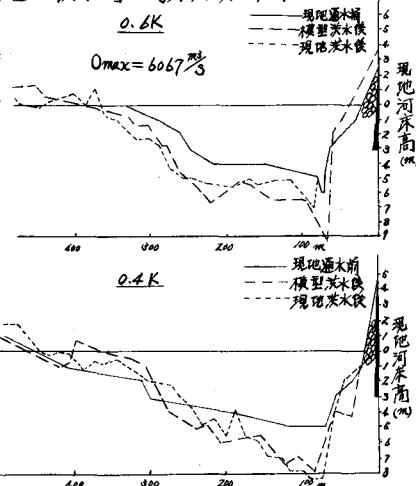
図2 最上川河口

砂の比重が小さいと浮遊砂の濃度は同一の $H_L/\sqrt{gH}W_0$ に対して大きくなる。また s の違いは平衡海浜形状に影響をあたえるようである。河道部の河床変動は $(V/\sqrt{gH})_r=1$, 無次元掃流力比 $\tau_*r=(1R/sd)_r=1$, $(V/W_0)_r=(\sqrt{gH}/W_0)_r=1$, とすることが望ましい。この模型では $\tau_*r=5$, $(V/W_0)_r=1$ で同一流量では模型の方が動きにくい。ただ浮遊砂の濃度分布形はほぼ相似と思われる。

○河床変動の時間縮尺の決め方

砂州のフラッシュや河道の洗掘、堆積を模型実験で求める場合、河床変動の連続式から求めた時間縮尺で洪水を流した方がよい。流砂量の多い場合には、 τ_* の違いは時間縮尺の中にある程度くりこんだ形で解決しうる。ただ、浮遊砂の多い場合には、洗掘場所、堆積場所を合わせるためには $(V/W_0)_r=1$ を必要としよう。この時間縮尺を求める場合、流砂量公式に疑問があるので、検証実験にたよることになる。最上川では洪水前後の河床変動、砂州のフラッシュ量、ピーク水位の現われる時刻、水位が合うかどうかを、模型と現地データを比較することによって時間縮尺を調べた。検証実験によると $t_{sr}=40$ 位であることがわかった。図3は現地洪水前後($Q=6067\text{m}^3/\text{s}$)の河床高と模型の変化を示した。これによると $(V/W_0)_r=1$ だったせいか河床変動の相似性は良い。砂州の開口幅も現地240mから280mの広がりとはほぼ対応していた。洪水のピーク値もほぼ現地と同じであったが、流量の小さい時には模型の方が高かった。大流量時には水位の相似性が良いが小流量時には疑問が残った。このことから洪水時のように河道内から塩水が海にでてしまうような場合の河床変動は、初期河床を現地に合わせれば、ほぼ相似な運動をしてくれるものと判断した。

図3. 洪水時の河床変動の相似性



○海部の洪水時の土砂の堆積の相似性

塩水の存在しない場合で河床砂が浮遊型式で運ばれる場合、河口からはき出された土砂は主流の両側に高いバーを作り、(流速の遅い所に沈積するため)掃流形式だと舌状に堆積する(斐伊川)。海水の存在する場合には、内部ジャンプとも関係し、浮遊砂の場合、釣がね状に外辺で高いバーを作り、河口前面にも浅い部分を作る。(例 最上川、石狩川)このように密度差の相連に原因して海部の土砂の堆積状態は、模型と現地では異なっている。また、利根河口の出水時の航空写真によると表面の流線のひろがり方は模型実験と異なっていた。ただ河口近くの主流のポテンシャルコア近くまでの堆積形態は、水平方向の拡散が密度差にあまり影響を受けないと思われるので、ほぼ相似と考えて良いのでなかろうか。

○模型にあてる波の決め方と砂州のでき方

筆者らは始め、模型にあてる波を決める時、相似性に疑問があるので現地の地形変化を決めるような波を検証実験によってさがそうとした。その目安としては砂州の発達状況を見ることにした。河川流としては低水流量 $162\text{m}^3/\text{s}$ をあて、波向き、波高を種々変えて行なった。その結果は波高を0.6mに落としてもどうしても現地と相似な砂州ができず図4のような砂州ができしまい、むしろ河口幅を拡げることもあった。その原因として塩水くさびの存在が考えられた。現地では塩水のそ上によ

り淡水層の厚さが減じられ、河口では淡水層の厚さは約1 mであり、河口水深が5 mであるので現地流量の約5倍の流量を模型上で流せば現地表面流速に近くなるものと思われる。また砂州の延進は、砂州汀線に沿う走り波の速度と流れの速度がぶつかり、ちょうど速度がおそくなる所にたまることがわかったので流量を800 m³/s、波高を0.6 mとした所、ほぼ現地と同様な砂州を作ることができた。

このことより最上川河口砂州の形成は次のように説明できる。開口部の水深は5～6 m有り、ここを動く土砂は少なく砂州は汀線付近を動く土砂によって形成される。図9に示されるように波が強いと砂州の①点をけずり取り、波は河川側に奥まで入って回折波によって州はD型のように鎌型になり、開口部をむしろ広げることもある。(現地においても秋期に開口幅が広い時、冬期流れの作用が弱いためD型の砂州が発生している。)流れが強い時には波は河口内に入らず、砂州をけずった土砂はB型のように堆積する。波と流れがうまく釣合うとC型のように州は延びる。その方向、形は、波の強さと、流れの変化によって微妙に変わり、その変化の程度によっては複雑な砂州型を作る。この場合、海水と淡水の密度差による塩水楔の影響は大きい。このような砂州の発達の方は、河口水深がある程度深い(4 m前後)の河川で見られ、川内川、米代川、江の川、北上川でも見られる。河口水深の浅い小河川、扇状地河川では二次元的な砂州(波による砂の打上げ)が発生し、海岸線が河口まで延びたような砂州が発生する。通常の河川では二つの砂州発生の合成した形で州が発生すると考えられる。このような砂州の発達の仕方から最上川では、導流堤工法が効果があると考えられるが、導流堤を河口に作った場合の波による変化を見るにはどんな波、方向、河川流をあたえて良いかが問題となった。導流堤をある程度長くして作った場合、汀線方向の土砂移動は止められるから、汀線に直角方向の土砂移動が問題となる。この方向の運動は相似律で述べたように相似性に疑問があり、また塩水楔の影響を取り入れることができない。結局種々の波高、波向をあたえ、導流堤内の土砂の移動状況を見ることにした。流量としては800 m³/sをあたえると一度浮遊した土砂は沖合の方に移動するので危険側の結論をあたえたと考えて162 m³/sをそのままあたえ、でてきた結果をそのままのみにせず定性的判断にとどめるようにした。この実験結果によると波高の変

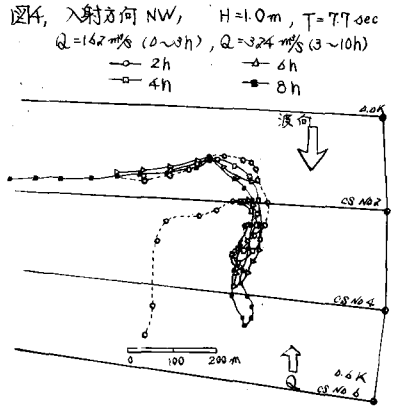


図5 入射波向 NW Q=800 m³/s (0~10h) H=0.6m
Q=500 m³/s (11~29h) H=1.0m

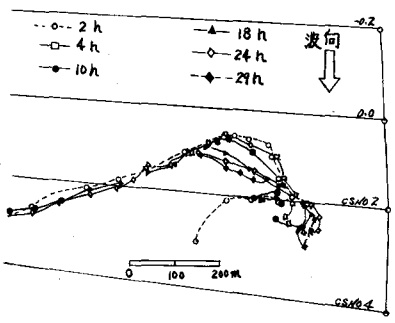


図6 現地の砂州変化例

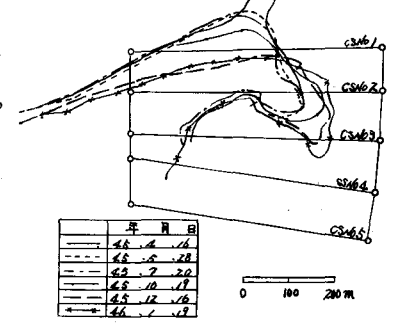
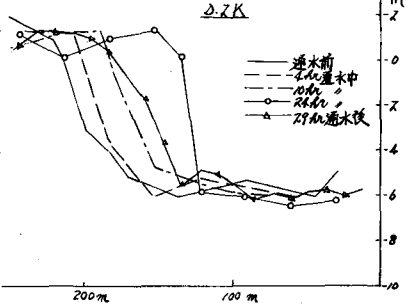


図7 河口横断面の変化(模型)



化は河道内の土砂の沈積にあまり影響をあたえず、また波高の大きい波（4 m）は沖で砕波し、導流堤内の土砂移動にはあまり影響をあたえず、波高 2 m（導流堤先端付近で砕波、水深 - 4.5 m）の場合が先端付近に沿岸砂州（水深 25~3 m）を作り一番浅くなった。1 m の場合には波は砕波せず、河道内に進み、底質の移動は少ない。導流堤幅は 400 m と 300 m で実験したが、河床高の変化はほぼ同じであった。なお、この州は融雪出水によって海にはき出される。その効果は導流堤幅が狭いほど良い。

○潮位変動について

日本海側の河口は潮位変動は小さく（潮位差 15 cm）、潮位変動が河口流量におよぼす影響は計算の結果小さく無視した。太平洋側河川の実験および tidal basin の大きい河川では潮位変動をもちこんだ実験が必要となろう。利根川では $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ のオーダーの流量を生じている。

○波と流れの干渉

波と流れの干渉による波のステープネスの変化等（沿岸砂州の発生位置に関係する。）は密度流の効果があり、正確には一致しない。ただ波が大きい時は淡水と塩水は急速に混合するものと考えられ、河口近くを除いて、ほぼ相似性が満足しているのではなかろうか。

○初期形状

波による地形の変形を見る場合、初期海浜形状は一つの大きな factor となる。最上川の場合、河口位置は現状のままであるので、海部は現況の海浜形状を、導流堤内は、計画河床高 - 4.5 m（この河床高は河床変動計算等により、波を考えなければ、長期的にも安定であると考えられる。）とした。この河川の場合、河口前面は河道より運ばれた土砂により海浜勾配がゆるく、浅い水深の部分がかかなり長い。この浅さは、波高の高い場合、波を沖で砕波し、波高減衰を助長し、河口を防る上で有効となっている。今筆者が実験を行なっている千代川河口においては、現河口に港を作る計画があり、河口のつけ変えが計画されている。この場合海浜勾配を現況のままとすると、勾配の急なためか、最上川と同一な波をあたえた時二次元的砂州が発生している。砕波点が河口に近く、波のエネルギー減衰効果が小さいためと思われる。この模型に大出水をあたえ河口前面を大きく堆積させると砂州の発生は小さくなる。将来河口前面に土砂がたまり海浜勾配がゆるくなることを考えると、現況海浜を初期条件とすることには疑問が残る。しかし将来どのような河口前面の地形変化を生ずるかははっきりせず、実験条件として初期形状をどうあたえるかは疑問点のまま残っている。また導流堤内水深も、河道の長期的な安定性を考えないで、河床高を決めると間違いのもとになる。

○沿岸流、離岸流

筆者らは海の中の流れは、導流堤内の河口維持の検討に影響が少ないと考えていたが、千代川の実験によって海浜変化におよぼす効果の大きさにおどろかされた。底質砂が浮遊形式で運ばれる時には流れの効果は大きい。特に港の防波堤などの構造物がある時定常的な海沿流が発生することがある。

図8

現地河口断面の変化

C.S. NO.2 (0.2 K)

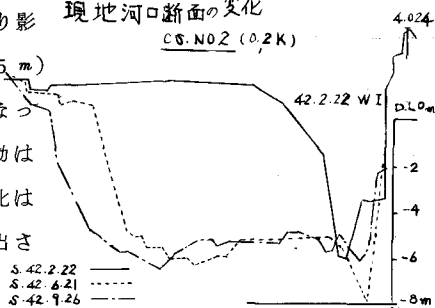
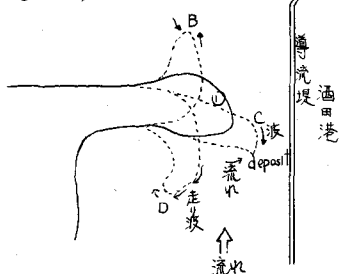


図9 砂州の形成



このような流れを相似させるためには反射条件等を現地と模型で相似にする必要があろう。

○海床変化の時間縮尺

相似律で述べた無次元量が、現地と模型が同じであれば、時間縮尺はフルード則によって求まる縮尺で良いと考えられる。同じでなければ検証実験にたよることになるが、外力の変動性のため検証しえない。それゆえ海床変化が小さくなるまで実験をつづけることにした。一応の目安として河床変動から求めた時間縮尺を取った。

4 河口模型実験結果の河口計画への利用

河口計画は河道全体計画の一部であり、河道計画や海岸計画と調和したものでなければならない。河が持つ相を良く考慮し、河口に無理なく接続する必要がある。この河道計画より計画高水量、ハイドロが決まり、河口の状況を加味して河口計画の概要も決まってくる。ここでは最上川模型実験の結果をどのように河口計画を考える上で利用したかを述べてみよう。

〔出発水位〕（洪水時の河口潮位）、現地資料を解析し $D.L=1.20m$ とした。〔洪水時の河道水位〕既往実測資料および模型実験、不等流計算により検討した。模型実験は粗度の相似が良ければ、河床変動も組み込まれた水位が求まり有利である。〔洪水による河口付近の流れと砂州フラッシュおよび河床変動〕実測資料、航測資料、模型実験より判断したが、検証実験の結果相似性が良かったので主に模型実験結果を利用した。〔河道の長期的安定性〕この判断は主に河床変動計算（区間 20 km 、7年間の流量をあたえる。）にたよった。河口近くの安定性は模型実験によっても見つめることができた。〔導流堤内の土砂のフラッシュ〕導流堤内にたまった土砂のフラッシュは主に模型実験によって判断されたが、実測データの解析より河口幅と流量の関係、塩水くさびの存在条件などを考えて検討した。〔導流堤内による河口維持〕模型実験および現況河口の変化状況、酒田港改修による海岸地形の変化などを参考にして、河口維持が可能か検討した。〔塩水遡上〕実測値を検証として数値計算によって判断した。〔波の進入〕模型実験にたよった。〔隣接海岸への影響〕主に現地資料によったが、模型実験も参考にした。

最上川河口計画では上述のように模型実験結果を位置づけたが、河相の違い、現地資料の有無によっては、模型実験、基礎的研究成果、数値計算、他河川の経験、現地資料解析のおおの位置は変わるものと考えなければならない。模型実験結果の過大な評価、過少を評価をしないためにも正しい位置づけが必要であり、このような判断は、実験者、計画者の優れた判断力と経験を必要とする。その場合、模型のなかの現象を眺めることによって、判断の材料が与えられ、検討と考察のための時間が持たれることは非常に有意義なことであらう。

5 あとがき

模型実験の正確さを上げるためにも、河口現象の解明、相似性の検討を今後もつづけたいと思っている。ここでは河口模型実験の全貌の一部しか報告しなかったが、模型実験の実体を少しでも御理解いただけたら幸いである。

参考文献

- 1) 山本晃一、河口現象把握の問題点 土木技術資料 15-12 1973.12月
- 2) 須賀、山本、高橋ほか、最上川河口模型実験報告書 土木研究所資料 887号 1974.2月予定
- 3) 田中、岩垣、Nayak 等の論文、港湾技術研究所報告 Vol.12, No.2, 1973.2月ほか