

II—15 石狩川の河口部河道計画と大型水理模型実験

北海道開発局 正員 館谷 清
“ 正員 橋本 誠秀
開発局 土試 正員 井出 康郎

1 はじめに

石狩川は日本有数の大河川であり、その流域には道内人口の約半数が生活を営んでいる。とくに下流部は石狩湾新港の建設、札幌市の北部への著しい発展などと相まって、沿川流域の重要度は極めて高く、治水・水上安全な河道整備が望まれている。このような状況の下で、昭和50年8月洪水を契機に、昭和40年に策定された計画流量の見直しが実施され、その後の56年8月洪水という大洪水も考慮して、昭和57年3月に流量改定がなされた。これに伴い、河道計画の策定が急務であるが、石狩川河口部は河口を含めて、急縮、急拡、弯曲といった河道条件を有しており、理論的あるいは数値的解析では解明できない課題が多いため、水理模型実験による解明が昭和53年より開始された。本報は、石狩川河口部河道計画の基本的概念ならびに、この目的のために実施されている大型水理模型実験について報告するものである。

2 石狩川の河口部河道計画

2-1 河口部河道の変遷

図-1は石狩川河口部の河道変遷を示したもので、明治31年の洪水を契機に、蛇曲の著しい河道について捷水路方式による改修計画が検討されて、大正7年に最初の生振捷水路が着工した。このことにより、蛇曲の著しかった河道が直線化され、現河道に至った変遷がうかがわれる。現在では、KP 0/3～5/8にかけての天臼場弯曲部が改修前の蛇曲河道の様相を呈している(図-2参照)。また、左岸の砂洲の発達に伴い河口は北上し、明治7年から昭和32年までに1,700mも移動したが、昭和35年から河口導流堤工事が実施されるにつれ、河口の変動は少なくなった。図-3は河床高縦断を示したもので、平均河床高、最深河床高とも経年的な変化は少なく、やや河床低下の傾向がうかがわれるが、安定しているものといえる。KP 0/1付近および0/3～5/6にかけて、最深部が著しく深くなっており、これらはそれぞれ、河口狭窄部および弯曲部である。弯曲部の河道断面形を示したのが図-4で、弯曲部特有の逆三角形河床形が表われている。経年的には、大きな変化は見られない。

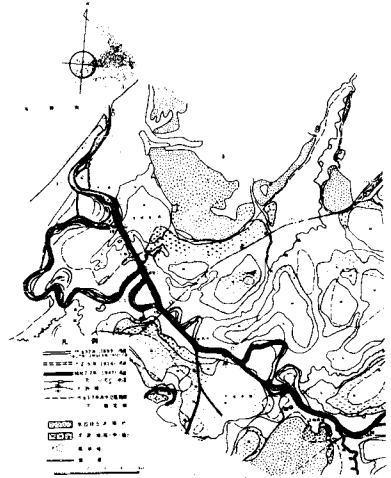


図-1 河道変遷図(木下良作氏による)

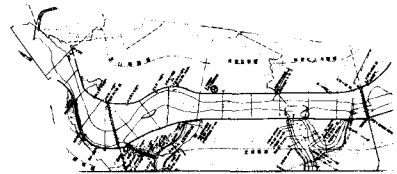


図-2 河口部平面図

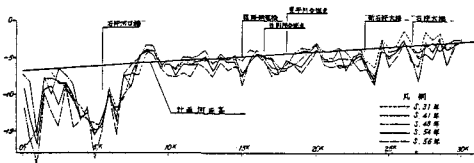


図-3 最深河床高縦断図

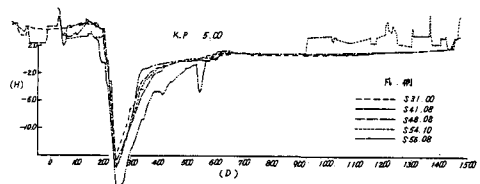


図-4 横断図 (KP 0/5)

2-2 河口部河道計画

石狩川は昭和57年3月に流量改定され、計画安全度は、1/100年から1/150年に改定され、河口部における基本高水流量は $9,700 \text{ m}^3/\text{s}$ から $19,000 \text{ m}^3/\text{s}$ に、計画高水流量は $9,350 \text{ m}^3/\text{s}$ から $15,000 \text{ m}^3/\text{s}$ に改定された。河道計画の基本的考え方は、

①縦断計画；現行にくらべ増加した計画高水流量を河道に流下させなければならないが、計画高水位を高めて堤防を大幅にかさ上げすることは、石狩川沿川の土地利用が高度化しており、また、地盤が軟弱のために高い堤防の築造が難しいこと、および治水安全度の観点から外水位を高くすることは望ましくない等の理由により、計画高水位は基本的に変更しないものとし、計画河床高は現況の最深河床高、平均河床高を配慮し、従来計画に準じて設定されている。

②横断計画；計画横断形状は、所定の計画高水流量を流下させるために必要な河横を確保することを条件とし、低水路については、維持を考慮して所定の幅を計画した。河口部の低水路幅は、河口～5/8までを400mに設定した。

③平面計画；堤防法線は原則として、現在の堤防法線を変えないものとした。低水路法線は現況の低水路を尊重し、蛇曲の著しい箇所についての安全な流下を配慮して計画を定めるものとした。河口部の河道形状については、2 ways 案（左岸側低水路幅220m、右岸側低水路幅200m）が検討されており、水理模型実験の成果をふまえて最終的に決定される予定である。

図-5に2 ways 案を示す。

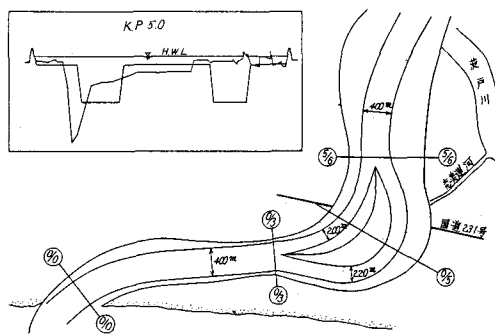


図-5 2 ways 案

3 石狩川河口部河道の水理課題

3-1 河口部河道の検討課題

河道計画の課題は、所要の流下能力が確保され、安定な河道を設計することである。このために河川の水理特性とこれに伴う河床変動機構の解明が必要であり、石狩川河口部においても検討すべき課題が多くある。

①河道内水面形；河口水理現象、急縮・急拡による水位堰上げ、弯曲部における水理現象等により、縦横断面水位の数値解析を困難にしている。

②河床変動特性の把握；洪水規模毎の河道内の流れの挙動を把握し、洗掘、堆積、河岸欠壊などの機構を解明し、安定な河道断面形を選定する。

③緩勾配、細粒河床材料を有する石狩川河口部の低水路の適正な河道維持の方策を立てる。

④高水制御計画；高水処理にあたって、低水路、高水敷の治水上の適切な流量分担、河川管理施設の安全と河道維持の検討、および対策工の策定。

などが挙げられ、これらは理論的検討のみでは解明が困難であり、水理模型実験および現地観測と合わせて検討することを必要としている。

3-2 水理模型実験の意義

河川流の研究手段としては、理論的研究、数値解析的研究、現地観測による研究、水理模型実験がある。これらの手段は相互依存の関係にあり、単独で解決できる問題は少ない。水理模型実験の特質としては、模型内の現象を実際に目で確かめられ、数値的に解析し難い複雑な現象も再現できることが挙げられる。しかし、模型上に全ての水理現象を再現することは、相似律により不可能であり、目的に応じて犠牲になるべき因子が定められる。相似律における問題点は、重力から定められる Froude の相似則と粘性力から定まる Reynolds の相似則において、相反する縮尺比を要求している点にある。この問題は小縮尺模型では深刻であり、対策として歪模型が採用

されるが、模型を至ませることは、幾何学的、運動学的相似を崩すことになり、流速分布の状態が変わり、弯曲での流れや河床変動のパターンに影響を与える。従って、できる限り大きな縮尺模型を採用した方が好ましい。とくに石狩川河口部では、上記の課題から考えて大縮尺模型が要求される。

4 石狩川河口部大型水理模型の作製

4-1 大型水理模型の作製

水理模型が実際の現象を正しく再現するためには、実物と模型との間で力学的な相似が成立し、現象を支配する方程式の解が同じ形にならなくてはならない。固定床模型では流れの相似性が保たればよい。即ち一般の開水路流れでは重力が支配的であり、Fröudeの相似律が適用される。移動床模型では流れの相似性の他に、流れの底境界（河床）の形状、変形速度の相似性などが要求される。石狩川河口部水理模型は固定床模型とし、検討課題が3次元流れの性格の強い水理現象を対象としていることから、無歪の大縮尺模型が採用される。模型縮尺は、粘性効果に対する限界、モルタル河床では滑面に仕上げて粗度係数は0.01が限度であるという模型製作上からの制約、および測定器の能力からの制約などから判断して、1/50が決定された。模型実験の実施範囲は河口～KP 0/13 まどとし、河口～8/14 まどを固定床で製作した。河口付近の海域は汀線方向2 km、沿岸方向2.5 mを範囲として作製した。模型断面としては、予備実験は現況河道断面として昭和52年測量断面を、本実験は計画河道断面を用いた。河道模型は全長約350 mで模型上への供給流量は $0.75 \text{ m}^3/\text{s} + 0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ の2系統のポンプが予定されており、縮尺1/50の模型上では、現地換算して最大 $20,000 \text{ m}^3/\text{s}$ まで実験できるように計画されている。また、下流端水位は任意の値が設定できるように、海域部にゲートが設置されている。

4-2 予備実験

予備実験は模型実験の再現性の検証、および現況河道における洪水時の流況把握について実施された。模型実験の再現性の検証方法は、現地における洪水記録を基にして水位及び流速分布を合わせるように河床の粗度を調整した。粗度調整はその程度に応じて小砂利（5～20 mm）をセメントペーストで河床に張り付け、また高水敷は碎石（40～80 mm）を用いた。依水路の検証は、現地流量 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3,500 \text{ m}^3/\text{s}$ を、高水敷の検証には $6,800 \text{ m}^3/\text{s}$ を流下させ、水位および表面流速について調整を行なった。検証結果は図-6および図-7に示すように、模型上で現地洪水を再現できることがわかる。次に、 $12,100 \text{ m}^3/\text{s}$ を検証の終わった模型で流下させたときの水位を図-6に示す。実験水位は計画高水位を0.5～1.5 m程度上まわっており、計画流量規模の洪水を安全に流下させることは困難であり、河道改修が必要である。とくにKP 0/3～0/5の弯曲部付近で

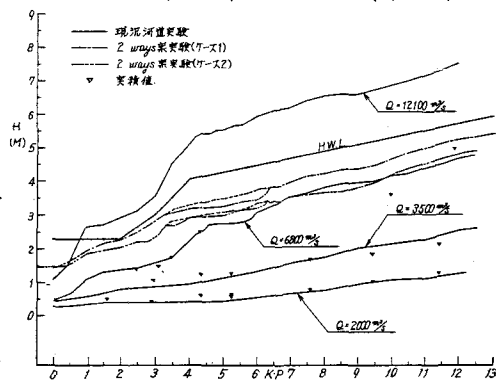
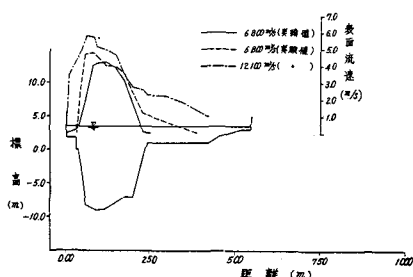
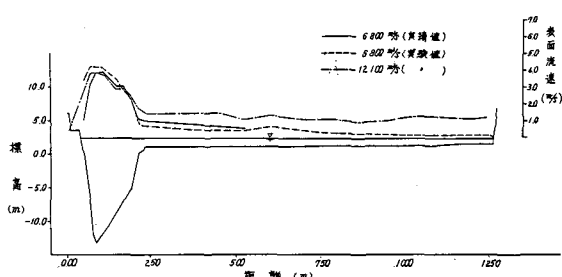


図-6 水位縦断面図



(a) KP 0/3



(b) KP 0/4

図-7 表面流速横断分布図

の水位の上昇率が大きく、この区間の水位を如何に低下させるかが課題である。またKP 0/5より上流側でも計画高水位に較べ水位上昇率が大きく、河横の増大が要求される。図-7の表面流速分布図から、流量規模により流速分布形が変化する。すなわち、流心の位置が移動することがわかる。

5 石狩川河口部現地観測

河道計画の検討に当っては、多くの実際河川における洪水時の流れ、河床変動等に関する情報が得られていることが望まれるが、一般にその観測の困難性などからデータが少ない。そこで、54年以来石狩川河口部河道における洪水時の諸現象のデータを得るために、融雪出水の観測を実施しながら、より大きな洪水時の情報を得るべく観測体制を組んできた。ここに、56年8月の大洪水が襲来したため、各種観測を集中的に実施した。この結果、今後の河道計画上に大きく役立つ貴重なデータが得られた。

①河口部河道水面形の観測

水面形の観測は、矢臼場弯曲部の左右及び河口部に観測点を密に配置したほか、河口から料標0/15間に28点の量水標を設置し、各点に観測員を置いて同時水位の連続観測を実施した。昭和56年8月洪水時には、連続観測は48時間継続したが、途中10点が24時間で継続困難となり欠測した。その結果をピーク時について示すと図-8のとおりである。50年8月洪水と比較して示したが、料標0/5付近ではその後の改修（浚渫）効果が顕著に現われていることがうかがわれる。この付近から下流は水面勾配約1/3,000で流下し、料標0/1付近から約1/1,000と急勾配となって海域へ流出している。導流堤沿いの水面形は、測定の際の難しさもあるが、明確な水面勾配は認められなかった。

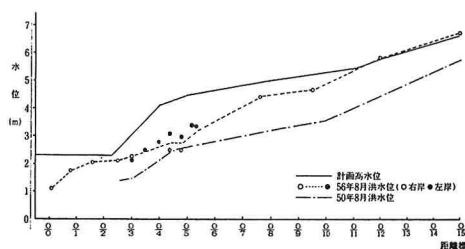


図-8 ピーク時水位縦断面図

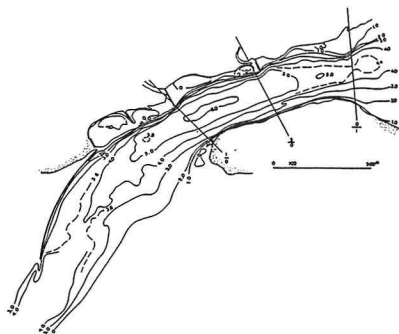
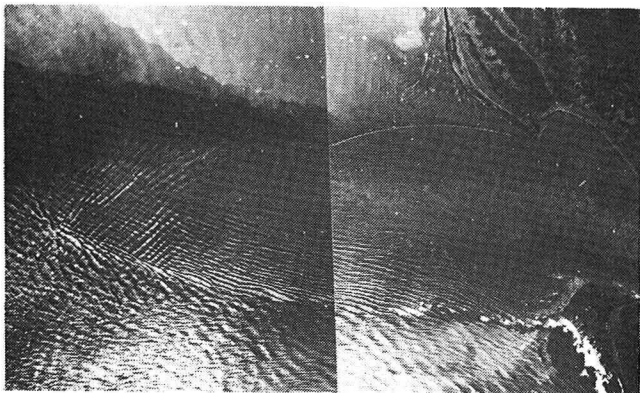


図-9 河口部表面流速コンター図

②洪水流速解析

洪水のピーク生起時刻が午前2時過ぎと夜半であったため、下降期に表面流速の解析を目的として航空写真撮影を実施した。区間は河口から料標0/66付近まで撮影し、河口部は6日午後3時頃撮影された。この時の流量は約10,000 m^3/s である。解析結果を河口について示すと図-9のようである。最大流速は河口からやや河道内に入ったところに生じており、6 m/s を越えている。50年8月洪水(6,800 m^3/s)と比較するとパターンは同様であるが、最大流速は約1.4 m/s 大きくなっている。河口の流れの状況を写真-1に示す。



写-1 河口部の洪水時の流れ

③河道断面形状の変動

下流部は一部断面を除いて河床は低下し、また河口弯曲、河幅変化、構造物などの影響が顕著に現われている。洪水前後の最深河床高と断面変化量の

縦断面図を図-10に示す。河口付近と石狩河口下流が大きく洗掘されており、河口では洪水前に比べて約8m洗掘され、断面積が50%増となっている。河口水位は殆んど上昇せず、断面を河床に確保して流下しており、洪水のフラッシュ効果が実証された。断面形状の変化の一例を図-11に示す。料標0/0は河床洗掘がすすんでいるのに対し、3.7/0は左岸の側方侵食が卓越している。流速の横断分布形と河道断面形との関係を見ると必ずしも最大流速の位置で最大洗掘が生じていないのは、2次流などの影響によるものと考えられる。

④河口部海床地形

図-12に洪水前後の河口・海域部のコンター図を示す。洪水前には汀線にはほぼ平行であった等深線が、土砂流出による堆積砂洲によって大きく歪められている。写真-1に見られる碎波線は、この砂洲の頂点を結ぶ線とはほぼ一致しており、この各状の先端は50年8月に比べて約400m沖まで伸びている。この砂洲は波とそれに伴う沿岸流によって移動し、一部は河口内へ戻されるものと推定されるが、大半は沿岸域へ運ばれ、河浜地形の安定に寄与するものと考えられる。

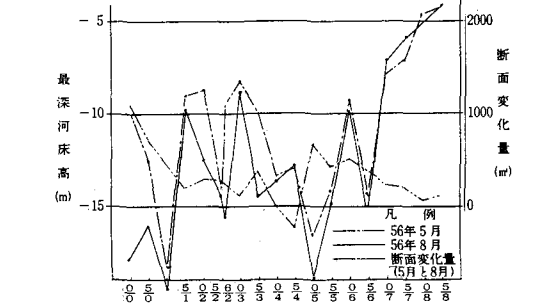


図-10 最深河床高、断面積変化縦断面図

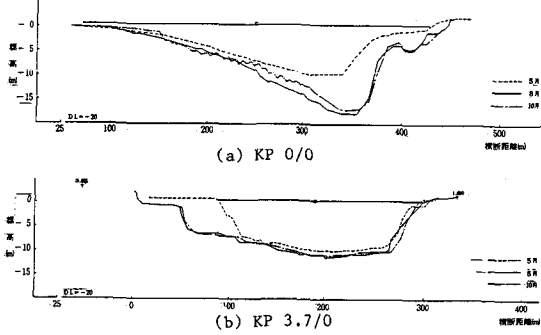


図-11 横断変化図

6 石狩川河口部大型水理模型実験

本実験は有力な河道案である2 ways案について実施され、実験ケースおよび実験条件を表-1に示す。前述の図-6には計画高水流量($15,000 m^3/s$)時の水位縦断面を示している。図から、ケース1およびケース2ともに計画高水位を下まわっている。現況河道での洪水実験値($12,100 m^3/s$)と比べると、水面勾配は非常にゆるやかである。とくに、現況河道では0/3~0/5の弯曲部にかけて水位の急上昇が見られたが、2 ways河道では大幅に改善されていることがわかる。流況については、0/9より上流側は直線河道となっているので、流心は低水路中心部を流れている。弯曲部では、右岸側新水路の流心は弯曲半までは河道のほぼ中央を

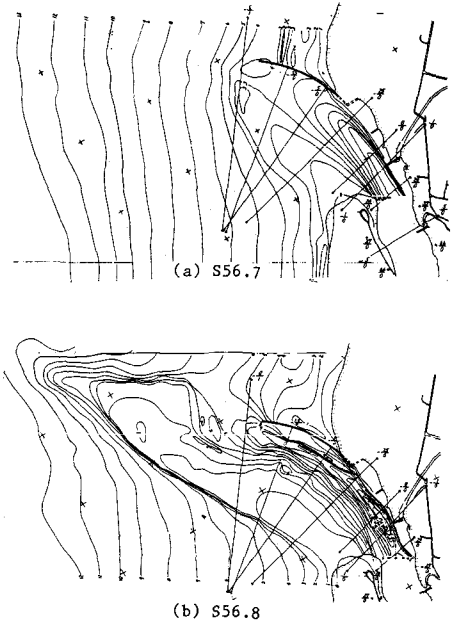


図-12 河口部コンター図

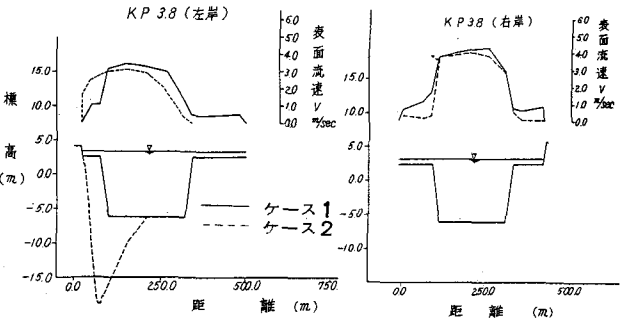


図-14 表面流速横断分布図

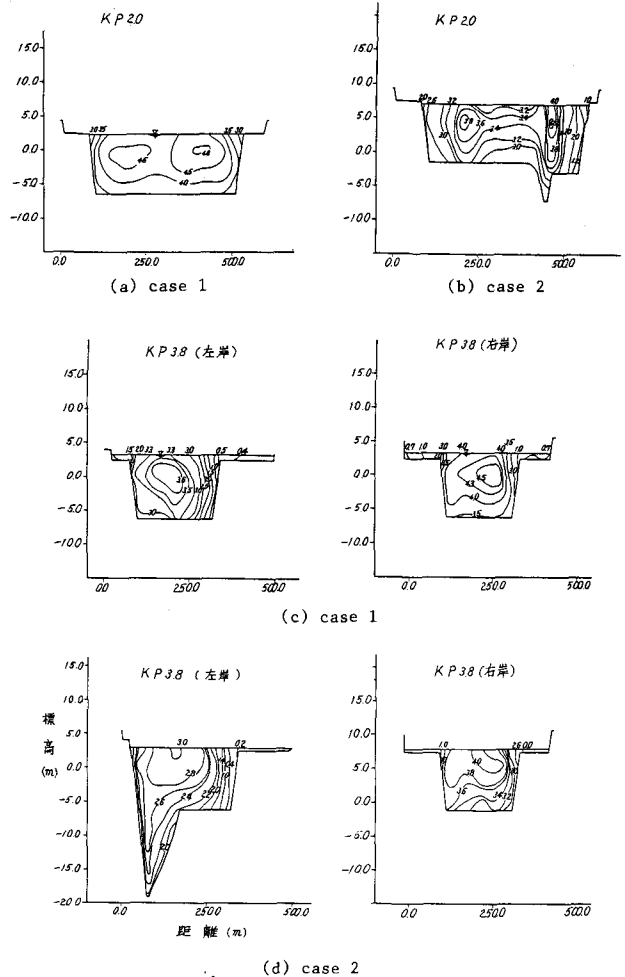
流れ、次第に左岸側へ寄りながら流下している。左岸側水路では弯曲の影響により左右に偏流しながら流下している。左右岸水路の合流後、流心は1つにならず2つ目の状態に流下している。(図-13参照)また、断面内の流速分布が深掘れの影響をうけていることがわかる。

図-14に表面流速横断分布図を示す。KP 8/3 左岸側水路では深掘れの影響により、主流部が左岸側へ寄っているのがわかる。しかし、現況河道ほど偏心しておらず、また表面流速も小さくなっている(図-7参照)。これらは、右岸側断水路による負担流量の軽減ならびに河道法線形の整正の結果であると判断される。表-1の左右岸水路の分担流量から、ケース1とケース2では関係が逆転している。これは、ケース2の方が河横が大きいこと、深掘れしているため分流点の形状がケース1と異なることなどによるものと思われる。

以上から、2 ways 河道案は、計画高水流量に対しても十分な流下能力を有し、その水面勾配は緩かである。また、流況等から判断して、左岸側河道の河床変動は現況に比べ、かなり緩和されるものと判断される。右岸側水路については、流況からは問題が少なくものと思える。

実験ケース	流量 Q (m^3/s)	下流端水位 Y_b (m)	弯曲部流量配分(%)		断面形状
			左岸側	右岸側	
ケース1	15,000	$Y_b \approx 1.40$	688.5	811.5	計画断面
ケース2	15,000	〃	810.0	690.0	深掘れ部を含む計画断面

表-1



(d) case 2

7 あとがき

石狩川河口部の河道計画に伴う大型水理模型実験は未経験の分野で、しかも石狩川河口部には河川工学的にも水理学的にも多くの課題が存在することから、石狩川大型水理実験委員会が設置されている。本報告の実験を実施するまでも、吉川教授、岸教授を始め多数の委員の先生方から御指導をいただきながら、種々の検討や水理学的解明が試みられている。この間、昭和56年8月には観測史上最大の洪水を記録するなど貴重な現地データも蒐集され、その解析も並行して実施されている。

本報告は、石狩川の河口部河道計画の概要、2-way案についての水理実験結果を主体にその概要を報告したものである。石狩川の河口部河道に関しては、今後さらに河道の安定、河道保護工など設計計画にも、局所的な水理現象の追加検討、移動床による追加実験などまだまだ多くの研究すべき課題が残されているものと考えている。

図-13 断面内流速コンター図