

石狩川下流部における洪水時の濁度鉛直分布と流れの構造について

On the Vertical Distribution of Turbidity and the Structural Feature of the Flood Flow
in Lower Reach of Ishikari-River

自由学園 木下良作 Ryosaku KINOSHITA

On sand-bed rivers the author made simultaneous observations of the river-bed formation along with the vertical distribution of turbidity at the time of flood flow, using the echo-sounder and turbidity meter. As a result of his observations it has become clear that there is a strong current curling up from the river-bed when the water-level is rising and the river-bed flattens out, whereas, when the water-level is lowering and sand-waves with considerable height are developing, the same current does not appear but becomes rather a quiet flow.

Key words: flood-flow observation, sand-wave, suspended sediment, bursting phenomenon, longitudinal vortex

はじめに

前回の水理講演会において、著者は洪水時の砂床形態の変化を、主として石狩川 5,000 m^3/s 洪水時(1988. 8. 26)の観測例をもとに報告した。¹⁾ その著しい変化の中、特に注目されたのは流れ表面の乱れのげじしい水位上昇期に河床は平坦化し、逆に乱れの静まる減水期に大きな河床波が発生・発達したことであった。このときの内部の流れの構造はどうなっていたのか、それを探るために、i) 濁度の鉛直分布、ii) 河床形態、iii) 表面流向・流速の横断分布の三者の同時的観測を、代表水域で繰返す案が記された。濁度の鉛直分布は内部の“まき上り水流”の存否や程度を探るため、表面流向・流速の横断分布は“並列らせん流”形成の有無を確かめるためである。そして音探で捉えられる河床波の種類やそれらの消長と対応して、流れの構造特性を考察しようというのである。著者は1989年度も北海道開発局に協力し、小・中2回の出水時、上記の観測に携わることが出来た。それらの中で標記のテーマに関する特に著者の創意に関する部分を、ここに報告させて頂く次第である。

1. 観測の方法

i) 濁度の鉛直分布：流れの早い洪水時の内部を計測するために、初めセンサーの自然流下ならびに沈下方式を考えた。濁度と深度の二つのセンサーを備えた測定桿の上部と下部の比重を著しく変え、水中で直立を保ちながら自然沈下し、着底させるという方式である。けれども測定桿の比重を調節しても、次第に延びる2本のケーブルの重みが加わって、その沈下速度はにわかに早まり、センサー内の濁水の自然交換が測定桿の沈下に間に合わず、深度と濁度の関係にズレが生じた。また流れに任せるとセンサーが常に乱流構造のある部分に位置しやすく、偏ったデータを送ってくる可能性も考えられたので、本番では出来る限り重い錘をつけ、流れに逆らいながら無理に沈めてゆく方式をとった。使用機器は東邦電探社製FN5型水中濁度計(0~1000°、コード長60m)である。ロープを1mの印ごとに手繰りだし、指針示度を読んで、後に着底ロープ長とii) による全水深値と対比して、観測点水深を補正した。

ii) 河床形態：方法は前報¹⁾と全く同様である。簡単な音響測深機(鈴木魚探社製BS-288型)を橋上に置き、60mのケーブルの先にセンサーを特殊な浮体に装着し、橋直下の水面から約50m自然流下させ、その流跡下の水深変化を橋上の機器に記録させる。その流跡の方角および流下所要時間、時刻等を記録し、その流跡を多数並列させてゆくことで、河床の三次元形態を把握した。

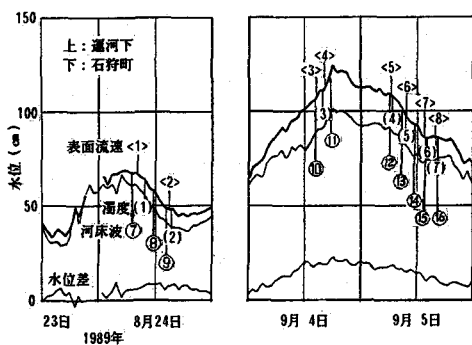


図-1 ハイドログラフと観測時点

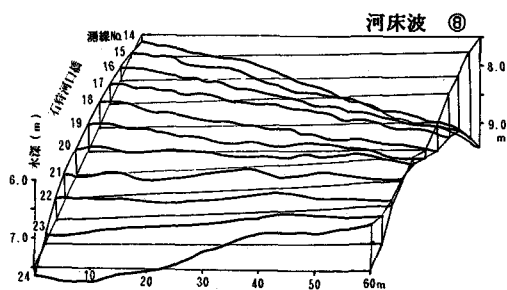


図-2 河床波鳥瞰図

iii) 表面流向・流速分布：“並列らせん流”とは表面流速の遅速分布が、水深の2倍程度の間隔で縦縞模様を呈する現象を称しているが、内部構造はまだよく分っていない。流向の測定も重要であるため、表面浮子流下方式をとった。流下距離は約30m、各測点で

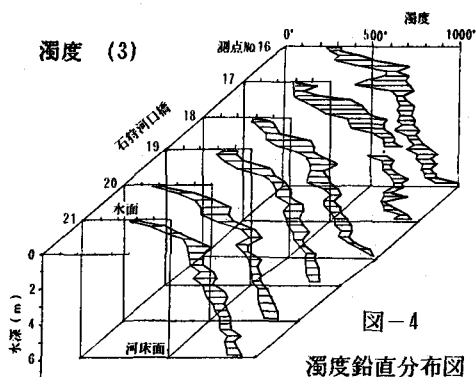


図-4

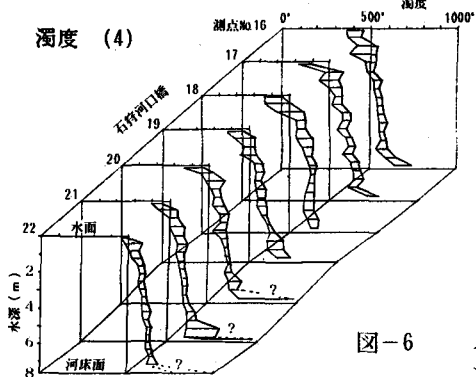


図-6

3回ずつ計測をくり返し、その平均値をとった。

2. 観測の経過

1989年、石狩河口橋において、前線と低気圧による降雨により、8月24日 1,200 mm/s (暫定) 9月4、5

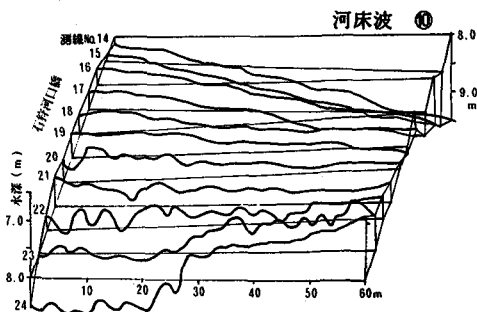


図-3

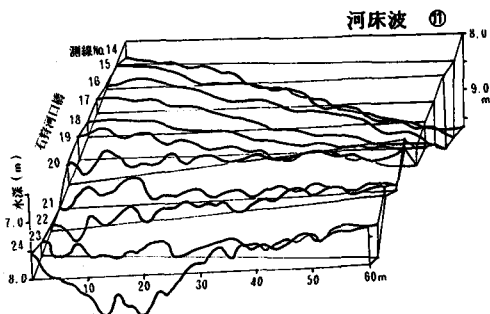


図-5

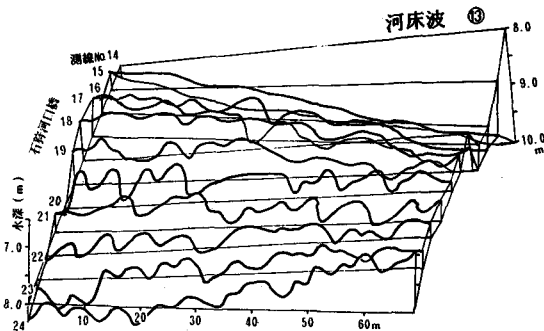


図-7

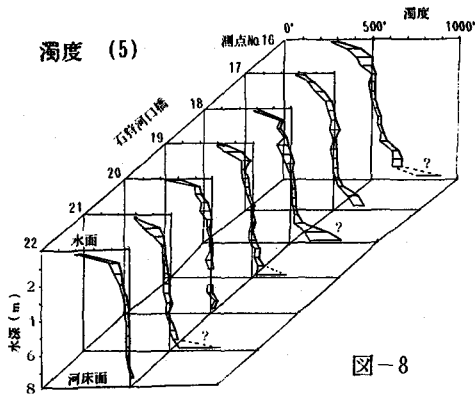


図-8

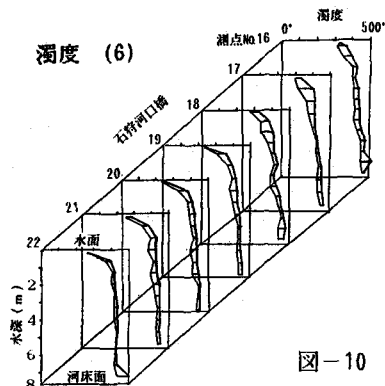


図-10

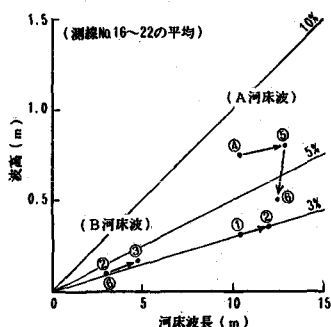


図-12 河床波長と波高

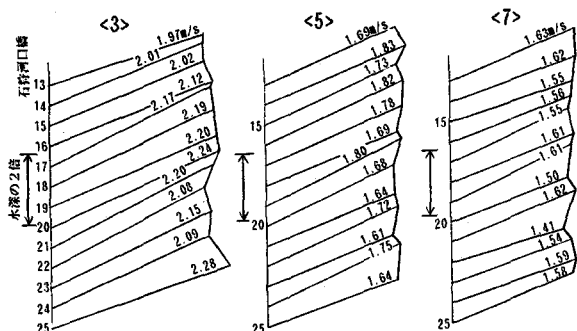


図-13 表面流向・流速分布 (並列らせん流)

日に $2,500 \text{ m}^3/\text{s}$ (暫定) の出水があった。前者ではそのピーク時から下降期、後者では上昇、ピーク、下降期と観測を実施した。代表水域は前報と同じ位置をふくむ、測点No.13から25までの13測点 (橋上の距離は 56.4 m) 流下方向距離は約 60 m 、その水域の表面流向

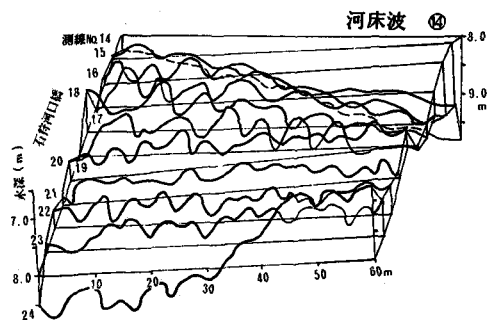


図-9

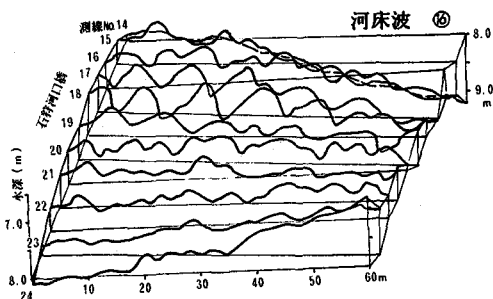


図-11

・流速と、河床波観測を行い、濁度鉛直分布は作業に時間を要するため、代表水域中央の測点No.16~22の7測点で実施した。二つの出水のハイドログラフと各観測の実施時期は、図-1である。河床波回数番号は昨

年の観測以来の通算番号をとり、⑦~⑩の10回、表面流速は本年度<1>~<8>の8回、濁度鉛直分布は(1)~(7)の7回である。

3. 観測の成果

3.1 濁度鉛直分布

この説明の前に、洪水時の表面濁度分布の特徴とその一般的推移を略述したい。流量増加とともに次第に濁度が増大するが、a) その初期はシルト・粘土等の微細粒子(Wash load)による濁りである。やがて(石狩河口橋付近でいえば) b) 橋脚の後流および低水河岸沿いのある幅の水域の濁度が著しく増大しはじめる。その河岸沿いの濁りの幅は次第に拡大するとともに、c) Wash Loadの明るい濁り一色の流心部にも、うっすらと円形の濁度の上った斑紋が見えるようになる。しかしこの段階で水面に鋸屑等を多量に散布して流下状況を写真測量しても、その円形の斑紋上の流れでも、水面を押し分けるような動きは全く認められない。²⁾ 風があれば風波はその斑紋上でも一様に立つ。しかしその時、橋脚の後流や河岸沿いの湧昇流の強い水域は slick で風波は立たない。さらに水位が上昇し、d) 流心部にもBoilが現れ出す。点々とした明瞭な黒い斑紋はやがて数と大きさを増し、e) 大洪水になるとそれが全面を蔽うようになる。³⁾ (このとき強い風が吹いても風波は全面で殆ど立たない) f) やがてピークに近ずき、水位上昇率が弱まり出すと水面のBoilもおだやかになり、ピークを過ぎると既に全面の濁度低下が印象づけられるような明るさになる。円形の大きなBoil斑紋も勢を失い、多数の小さい渦の束であったかの如くに、その濃淡に分解し始める。g) 水位下降期に入るとやがて斑紋も消え、Wash Loadの一色となり、それも次第に濃度を下げてゆく。以上は洪水時の推移の簡単な素描であるが、強いBoil斑紋とその周辺の採水比較によれば、その際立った濁度の差異は、その浮遊懸濁物質中の砂分の量の多少に強く影響を受けていることが明らかである。⁴⁾ 河床あるいは河岸という境界面、又は橋脚のような強い局所擾乱をひき起す構造物によって、どのようにSSや濁度の増加が生じ、それが流れの構造によってどのように水面に分布するかという問題である。

さて本年度観測結果の説明に移る。本年の出水程度は上述の段階でいえば、8月24日がc)、9月4、5日が漸くd)に入ったか否かの程度であった。その濁度鉛直分布の代表例は図-4、6、8、10に示す如くである。図-1にみられるように、図-4は水位上昇期の例である。観測は濁度計の針が振れる際、その大体の上限値と下限値、そして中央付近の比較的安定的な数値を読みとり、記録した。水面付近は300°前後で振れも少ないが、水深1m前後で700°位まではげしく振れるようになる。この付近で砂分を多く含んだ“まき上り水流”の頂部が次々と通過していることを示すものと考えられる。そしてセンサーの深度を深めると振幅は減少するとともにその濁度を上げ、底面に近づく程“まき上り水流”が濃密に存在することをうかがわせる。底面近くは900°前後の値を示し、その“まき上り層”全体の濁度の鉛直方向の傾斜は、ほぼ直線的にゆるく傾斜しているように認められる。この図-4と水位・水面勾配にそれ程の差がなくとも、ピークを過ぎ、水位下降期に入った状態の図-6は、図-4とは明瞭な変化を示している。表面濁度はむしろ若干増加しているが、その顕著な差違は全層にわたって濁度変動幅が著減しはじめていることである。そして、上下層の変動幅も減少し、その濁度傾斜は垂直に近く立ってきている。このことは砂をまきこむような強い“まき上り水流”が著しく勢を失なったことを示しており、このことは更に図-8、10に至って一層顕著となる。図-8、10は殆ど全層Wash Loadで占められ、砂分はほぼ沈下してしまった状態を示すものと考えられる。そして底面近くまで、砂をまき上げるような水流はほとんど終息してしまったとこれを見ることが出来る。また垂直に近く立ってきた濁度値は、図-6～10にかけて約600°から500°、400°と減少している。(今回の測定方法では底面近くの計測は不十分で、着底による擾乱でまき上ったものを測定してしまった場合も混入していることが考えられ、河床上0.5～1.0m付近までのデータはあまり重視出来ない。今回の観測に改善の余地を残している。なお今回以上の流量の洪水では、0～1000°の濁度計では計測は不可能になる。)

3.2 河床形態の変化

昨年度、5,000 $\mu\text{t/s}$ 洪水の石狩河口橋の観測で、波長10数mの河床波(A)と、波長3～5mの河床波(B)(波長は代表水域中の平均値)がそれぞれ別に現われたり、重複共存して現われたりした。本年度は

1, 200 ml/s、および 2, 500 ml/s と流量は小さかったが、それでもほぼ同じく (A) (B) のような二種の河床波の形成が見出された。10回の観測の中の6例を鳥瞰図風に示したものが、図-2、3、5、7、9、11である。(なお濁度分布図と並列掲示してあるが、図の配列の高さと図番が、その時系列を示している。例えば図-4の濁度は、図-3と5の河床波が測られた、その中間時点に計測されたことを意味している。詳細は図-1参照)

先ず8月24日の出水のピークから下降時に観測された⑦⑧⑨の代表例、図-2の⑧についてみると、全般的に極めてゆるやかな起伏しか示しておらず、明瞭な河床波を拾い出すのは難しい状態である。⑩⑪は増水期およびピーク直前の状態で、それぞれ流心部にはA波的なゆるい起伏が見られるが、しかしかなり平坦性が強い。それに対して流れの右側、橋脚に近づく側では、B波的な起伏が既に生じている。水位ピークを過ぎ、減水期に入った⑬からは、流心部でも一転A波的な河床波が現われはじめ、それは⑭⑮と一層活発に、その発達を続けている。一方右側水域のB波的な河床波は⑬⑭と波形が整って発達してきたようにも見えるが、A波とは反対に、⑯ではかえって消滅の方向に入ったように見える。これらを大観すると、流心部のA波的な河床波は減水期の⑬から顕著に発生・発達を続け、それは昨年(前報)の経過と全く同一である。図-12は昨年の河床波の波高・波長比の推移を平均値によって示したものであるが、①、②のA、および②、③、⑥のB波は殆ど3%の一定値を示しているのに反し、水位下降期に発達した④、⑤のA波は7~8%にも達し、⑥になって4%に低下してきている。個々の河床波では④、⑤では10%を超えた(波高・水深比でいえば20%にも達した)ものもあったが、本年の例を見ても水位下降期のA河床波の個々の例では、6~7%に達しているものも見られる。このように水位下降期に異常河床波が現われる(これを異常と呼ぶとすれば)という現象は、本年も軌を一にしたと言って良いであろう。そして注目すべきことはこの河床波の発達が、濁度鉛直分布からみれば、“まき上り水流”が衰弱し、浮遊砂が殆ど沈下してしまった時期に相当していることである。すなわち背の高い異常河床波は、強い“まき上り水流”をともなうことなく、洗掘と堆積の振幅を増大し、静かに発達していたのである。減水期、洪水流の表面の乱れは急に穏やかな相貌に変る、その静かさは実は殆ど河底にまで達しており、その下で背の高い異常河床波が静かに成長していたのであった。

3.3 表面流向・流速分布(並列らせん流)

1963年、洪水流航測着手と同時に見出された“並列らせん流”の存在については、これまで著者はいろいろな報文の中にしるしてきた。それらは何れも水面にさかんにBoilが上り、3.1で述べた段階でいえばe)に相当するものであった。(c)の段階以下では水面パターンがフラットで、写真測量は出来なかったともいえよう)ところが1987年天塩川のb)やc)の段階で、表面浮子の多数列流下観測の際、同様なその存在が浮かび上ってきた。Boilが水面に達しない、“まき上り水流”がまだ流れの中層にしか上っていないと考えられる段階で、しかし表面流速の横断分布には、±5%程度の遅速の差が、水深の約2倍の間隔で整然と並んでいたのである。

本年8回観測した中で、水位上昇中の〈3〉、ほぼ同水位で下降中の〈5〉、そして低下後の〈7〉を示したものが図-13である。収斂と発散が交互に並び、収斂部の流速が速く、かつ並列間隔が水深の約2倍である点で、何れも並列らせん流が存在していたと見られるものである。それは水位上昇期の乱流強度増大時にも下降期の鎮静時にも変わらず存在し、また河床形態の如何にもかかわらず形成されていたことになる。これは恐らく幅広い開水路流れに存在する、最も基本的、かつ普遍的な流れの立体構造なのであって、前述e)の段階で顕著に見出されたそれは、むしろこの基本的性質に拘束された姿であったのかも知れない。

4. 今後の課題

本論文における主要な結論は、以上の観測の諸事実である。そこには幾らかの新知見が開けたとしても、それにも増して多くの疑問に包まれたと言ってもよい。ここでこれからの調査・観測のために(作業仮説を

立てる意味からも) 若干の疑問をのししてみたい。

〈表層流について〉 今回の観測は小洪水の段階である。そして流央部では“表層流”とでも呼稱したい穏やかな流れが存在した。濁度も低下し、振動幅も小さく、8月観測時は厚さ約 2m、9月観測時は約 1m であった。大洪水は一面ボイルが湧いてこの表層流は消失するものとみられるが、航空写真等まず手びろく得られる情報がこの表面流況であることから考えても、この表層流の性質と、内部流況との関係を明らかにしなければならない。

〈まき上り水流について〉 パースト現象か、剥離した斜めらせん流のようなものか、縦渦の上昇成分も加わったものか判然としないので、本文ではただ“まき上り水流”とのみ記した。これは浮遊砂や物質輸送あるいは掃流現象にも関連する重要な現象と考えられるが、それは洪水の上昇期に圧倒的に偏在するようである。この乱流強度の増大は、水位上昇期が水域として見たときの「減速域」、下降期には「加速域」になることと関係しているのであろうか? このまき上りの強い「減速域」は、水位上昇にともなって掃流力増加が継続する意味で「洗掘傾向域」であり、下降期は逆の「堆積傾向域」となる。

〈河床波の発生について〉 天塩川・石狩川の1986～'89の観測によれば、一定して水位下降期に河床波(ただしA波)が発生、発達した。それは「堆積傾向期」に相当するが、その時の流れは穏やかで、強い“まき上り水流”はほとんど存在していなかった。一方定常流の不等流実験で河床波が形成されやすい部分は堆積傾向域であるが、ここは逆に「減速域」であり「乱流強度増大域」である。河床波発生条件に双方共通するのは堆積性であって、乱流の構造的性は関与しないのであろうか?

〈河床波の種類と分布について〉 A河床波の洪水時の挙動に対してB河床波のそれは著しく異っている。それはむしろ水位上昇期に活発のように見える。これはA波とは成因を異にする“砂堆”なのであろうか? それとも“砂漣”なのであろうか? またこの場合も乱流構造は関与しないのであろうか? また河床波の発生にはある地点で先行的に形成され、それが伝播的に下流域に拡大する場合がある。したがって今回の代表水域を考察するためには、上流側の状態の検索も必要である。地域的に時間的に、今後河床波データをひろく収集しなければならない。

〈河岸流況について〉 境界面が水面に達する河岸では、濁度変化をとまなう渦形成が、出水の初期段階から後期に至るまで長時間あらわれやすい。この渦域に対する非定常流の効果は今後写真撮影と画像解析により、容易に明らかにされるであろう。河岸水域の洪水時河床音探法を開発することにより、河道全域の流れの構造と河床変動は、今後一層明らかにされるものと考えられる。

謝 辞

本調査における著者の関与について、多くの御高配を賜った北海道開発局ならびに石狩川開発建設部に対し、ここに深甚の謝意を呈する次第である。

参考文献

- 1) 木下良作: 洪水時の砂床形態の変化、第33回水理講演会論文集 1989. 3
- 2) 北海道開発局留萌開発建設部: 天塩川河床波調査解析報告書(木下) 1987. 3
- 3) 木下良作: 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題、土木学会論文集 No.345 1984. 5
- 4) 3)に同じ