

II-27

石狩川における乱流と浮遊砂濃度の
同時計測結果について

北海道大学	正員	長谷川和義
北海道大学	正員	道口 敏幸
北海道大学大学院	学生員	柿崎 恒美
北海道大学工学部	学生員	大串 弘哉

1.はじめに

沖積河川における移動床問題、ならびに乱流構造に関する問題は、現代水理学の最重要課題であり、膨大な量の研究が積み重ねられてきた。その結果、実験室規模の重要問題はほぼ解明されたといえる状態にいたっている。しかし、現実の河川における計測---しかも河川工学上最も重要な洪水時の計測を基にした研究は決して多くなく、この分野の大きな空白になっている。これまでに河川の計測をもとにした研究から実験室では見いだせない重要な発見がなされ、それが分野研究の牽引力となってきたことはもちろんであるが、今日その重要性は一層増しているものといえる。

コルク・ボイルという大規模な強い渦は、Mattes(1947)らによる河川流の野外観測で見いだされ、Coleman(1969)、Jackson(1976)などによって研究された。彼らは当初から、それらが河床形態と密接に関係して発生する組織渦であり、高濃度の浮遊砂をまいあげる実体であることを示唆している。多くの支持を集めたこの見解は、河床波(段落ち)上の定まった位置から非常に強い大規模乱れが発生し、これが浮遊砂の有力な原因となるとする板倉(1984)、中川・棚津ら(1989)の実験によって確固となるかにみえた。これに近い観測結果が、幅4mの大型水路を用いた伊勢屋・池田(1986)の実験でも見いだされている。(ただし、彼らの観測結果は、河床波(砂堆)の発達期にのみ強い乱れと高濃度浮遊砂の生じることを明らかにしており、上記のものといくぶん異なる。)

ところが、木下(1989)は、石狩川1988年8月洪水における水位の上昇期および下降期に河床波の計測をおこない、「湧き返るような乱れの激しい水位上昇期の河床は平坦」であり、「流れの表面を見るかぎり一転して穏やかさを増す水位下降期には最も高さを増した河床波が発達する」ことを見いだした。ひきつづいて木下(1990)は、1989年8月9日の小中洪水において河床波とともに濁度分布および表面流速を計測して次の結果を得た：水位上昇期には、砂分を多く含んだ“まき上がり水流”が水面近くまで達し大きな濁度変動を示す。底面に近づくほど濁度が増し、“まき上がり水流”が濃密に存在することを示す。しかし、下降期には、水位・水面勾配にそれほど差がなくとも濁度変動幅が著減し、分布も立ってきて「強い“まき上がり水流”が著しく勢いを失ったことを示す」にいたる。このとき、河床波の発達状況は前述の観測結果と全く同じであり、上昇期に平坦、下降期に大きな発達がみられた。これらの結果は、明かに上記の見解や観測結果の逆になっている。木下の計測結果は、実際の洪水がいかに多様な様相を示すかを物語っている。

本報は、木下の今年度の石狩川河口橋における洪水計測に、同一箇所協同する形でおこなった採水による浮遊砂濃度計測と電磁流速計による乱流計測の結果について述べたものである。目的は、上述の木下の成果を踏まえてこれを追試するとともに、氏が直接計測していない浮遊砂濃度分布と乱れの洪水上昇期と下降期における性質の変化を知り、洪水現象のより深い理解を得ることにある。しかし、洪水時の乱れ計測は困難をきわめ、その方法を確立するために多くの努力を必要とした。そうして現在に至るも信頼できるデータは得られておらず、今後の改善を考えている。したがって、ここでは計測手法と濃度分布の計測結果におもきをおいて報告する。

Simultaneous measurements of suspended load and flow turbulence during a flood of Ishikari River
by K.Hasegawa, T.Michiguchi, T.Kakizaki and H.Ohgushi

2. 1990年9月洪水の計測

台風15号の接近に伴い、9月2日に南西から発達してきた停滞前線と、3日から4日にかけて北海道に位置していた低気圧の影響で、北海道北部から中央部にかけての石狩川流域に多くの降雨があり、その後下流部に小規模の洪水をもたらした。石狩河口橋の左岸から約60mの橋上で、9月4日11時より5日14時までと、6日0時より6時までの2回に分けて観測が行われた。同橋付近は川の弯曲部にあたり、また茨戸川との合流点にも近い。そのためか図-1に示す通り、観測点付近の水位変化は変則的である。なお、観測の期間は概ね曇りで、雨も風も少なく、気温も高めで、観測には絶好の天気であった。

3. 計測方法

3-1. 浮遊砂濃度の計測

採水は水深方向約1.5mごと6点につき、図-1の矢印番号(1)～(17)の時刻で図-2の採水器を用いておこなわれた。採水器は、2重のタンクになっていて、メッセンジャーというおもりをワイヤーロープに沿わせて落とすと、弁が開き水が動圧で流入するようになっている。これを図-3のような昇降ウインチに取り付けて橋の欄干に立てかけ、採水点まで降ろし、1分程経ってから引き上げる。採水器が水流に流されて浮かんでしまわないようにおもりをつけた。

3-2. 乱流の計測

直読式電磁流速計(横河ナビテック社製EMC107型 図-4はプローブ)は、電磁誘導の原理を応用して、直角な2成分の流速を計測し、これとマグネット方位データを演算処理して、合成流速と流向角度を表示する。このプローブをいかに安定させて設置するかが今回の観測までの準備で一番知恵を搾られた所である。ま

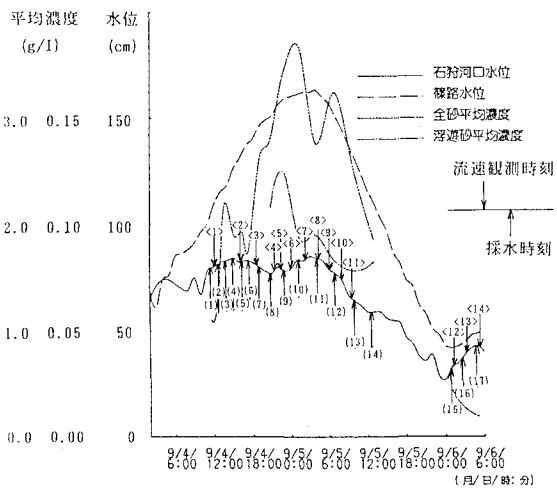


図-1 1990年9月4-5日洪水の水位、浮遊砂平均濃度の時間変動

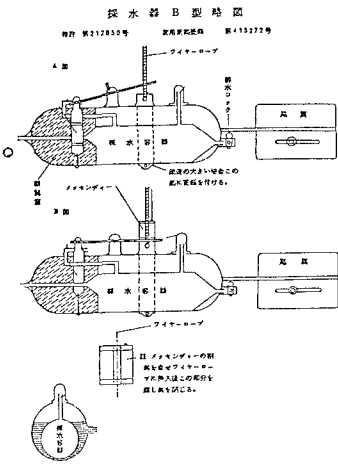


図-2 B型採水器の概要

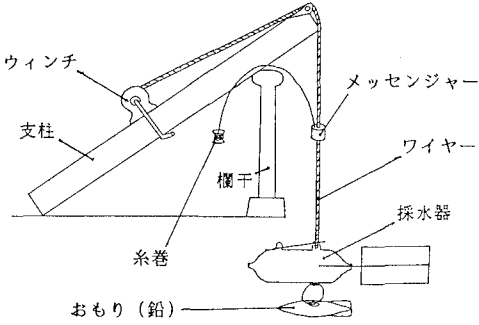


図-3 採水器昇降ウインチ

ず図-6 の昇降ウインチを欄干に立てかけて、おもりを河床に降ろしてワイヤーを垂直に張る。このワイヤーを図-5 のアタッチメントの⑤に通し、③の部分にプローブを挟みボルトナットで締める。④にロープを取り付け、ワイヤー伝いに降ろして行く。これでアタッチメントの自由度は1となり、更に②の羽で水流に対して一定の方向を向かせ、流速をはほぼ安定させようと考

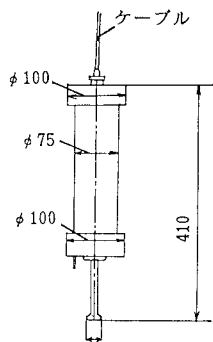


図-4 電磁流速計プローブの外形

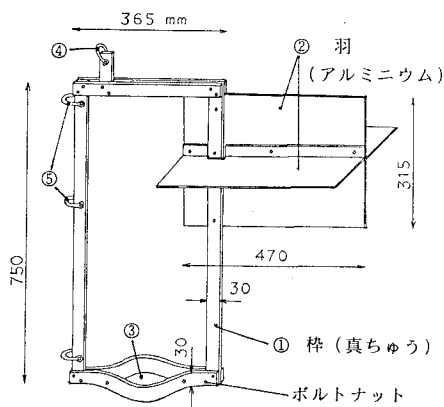


図-5 プローブ取り付け金具

えた。計測データに影響がでないよう、アタッチメントの材料には誘電率の低い真鍮およびアルミニウムを使った。計測は、図-1の矢印番号<1>～<14>の時刻において、水深方向に約1.5mごとに5ないし7点につきおこなわれた。

4. 浮遊砂濃度の計測結果

4-1. 水深平均濃度の時間変動

今回の洪水は、上流域でその波形がきれいな一つ山を描きながらも観測域の近傍で急速に偏平化し、あまり大きな水位上昇を見せることなく40時間ほどにわたって二つ山の変化を示した。このためか、流量規模の割に高目の浮遊分濃度がみ

られ、洪水表面の色調にもそれほど明瞭な違いが現れなかった。ボイルはときおり観測できるもののその勢いは認められず、上流からの痕跡が流れてくることが多い。

図-1 には、水深平均した浮遊砂濃度の時系列が併記されている。ただし、二点鎖線は全浮遊分の濃度を、一点鎖線は74 μ フルイにて分けた砂分の濃度を表しており、前者の濃度が1オーダー高くなっている（目盛りの違いに注意）。前述のように、洪水水位は河口橋近傍にいたって二つ山の変化を見せている。これを反映してのことと考えられるが、全浮遊分の濃度は三つ山の変化を示している。しかも、吉川(1954)はじめ多く研究者によって指摘されているとうり、洪水ピークのやや手前に濃度のピークがきている。ただし、第三番目の濃度ピークが洪水水位のどの時点の変化の反映かは必ずしもはっきりしない。興味深いことは、砂分の濃度ピークが全浮遊分の濃度ピークのさらに前に現れていることである。この現象はすでに木下により、利根川での表面浮遊土砂の採水観測においても見いだされている。砂分が河床から巻き上げられる純粋な浮遊砂であり、これより細かい成分がウオッシュロードであって河床材料に起因しないものと考え、後者の生産源ははるか上流ということになる。前者が洪水波のピークのかなり手前でピークをむかえるということは、水位上昇の早い時期において（何等かの原因で）最も強い乱れが生じ河床砂をまき上げることを意味するが、後者が洪水波の伝播とともに、それに先んじて伝播して来るといったことはどういうことであろうか。山地における流出の初期に、流水が多量のウオッシュロードを含んで流れ始めたとしても、長い流下過程では洪水波がこれに追いつき追い越す可能性は否定できない。しかし、次に示す分布図を見ても、これらの細粒分が河床とコンタクトをもつ浮遊砂の一部とみた方がよいように思われる。粒径の違いによるピーク出現時刻の違いは、沈降速度の違いに依存するものかも知れない。

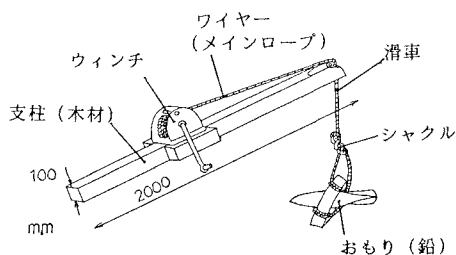


図-6 メインロープの昇降ウインチ

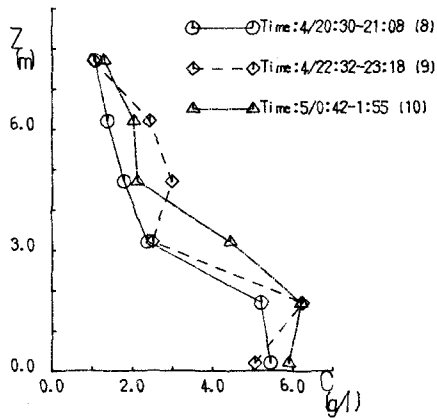


図-7 全浮遊分濃度の水深方向分布（上昇期）

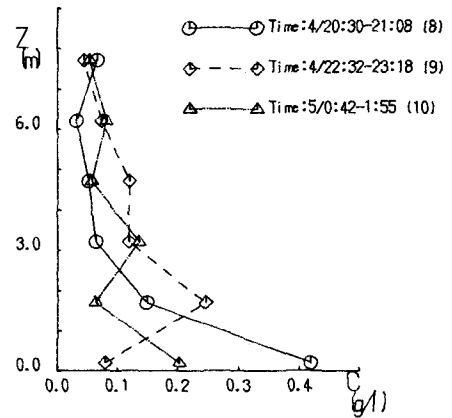


図-9 浮遊砂濃度の水深方向分布（上昇期）

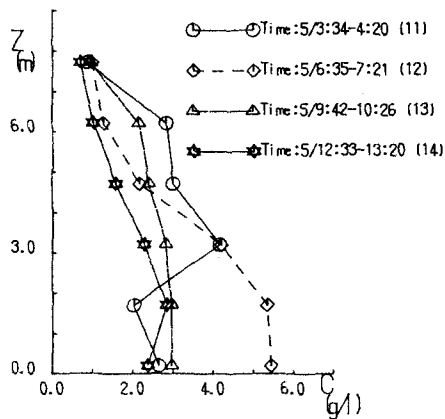


図-8 全浮遊分濃度の水深方向分布（下降期）

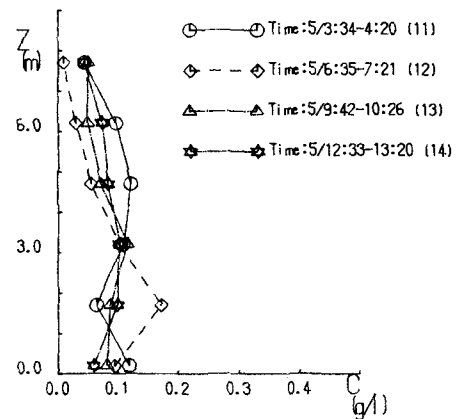


図-10 浮遊砂濃度の水深方向分布（下降期）

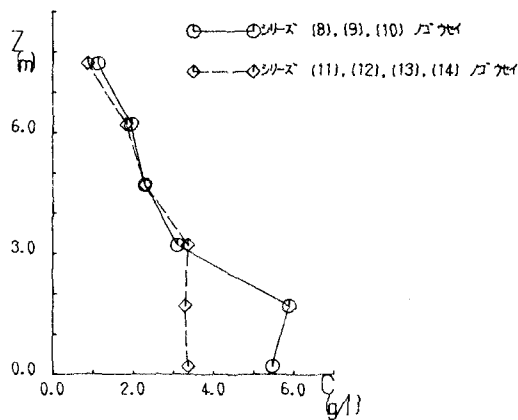


図-11 上昇期および下降期平均の全浮遊分・濃度分布

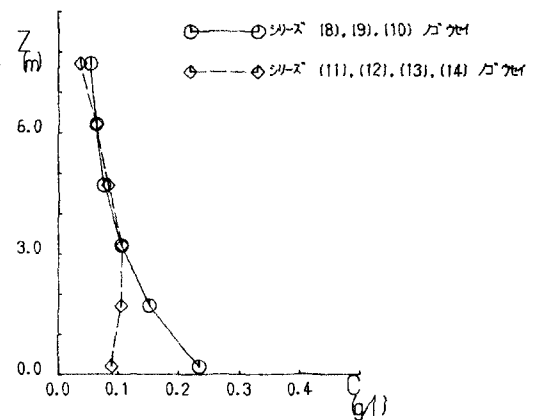


図-12 上昇期および下降期平均の浮遊砂濃度分布

4-2. 浮遊砂の水深分布

図-7 は、全浮遊分の洪水上昇期(8)(9)(10)における水深方向分布を見たものである。同じく、図-8 は、ピーク時(11)および下降期(12)(13)(14)における分布である。明かに上昇期の濃度が高く、しかも上昇期では底面近傍でそれが顕著で、底面から3-4mまでの膨らみに特徴が認められる。これは、底面からの“まき上がり水流”がこの位置にまで達しているものの、これ以上上昇するだけの勢いを有していないことを示すものといえる。下降期では全体に分布が立ってきており、底面からの“まき上がり水流”の弱まりが推察される。これらの結果は、昨年度の木下の濁度分布の計測結果と全く同じであり、その結論を補強裏付けしたもののといえる。図-9、10 は、それぞれ砂分の濃度分布の上昇期とピーク・下降期の値を示したものである。細粒分に比して1オーダー小さい値を示しつつも、分布の特性はほとんど変わらない。あえて指摘するならば、上昇期の底面近くの膨らみがあまり顕著でなく、Rouseカーブに近い形を見せていることである。

図-11、12 は、それぞれ全浮遊分および砂分につき、上昇期(8)-(10)および下降期(11)-(14)の各測定カーブを平均化して示したものである。この両図において興味深いことは、上昇期、下降期の二つカーブが底面から3m以上についてはほとんど一致していることである。すなわち、“まき上がり水流”の上昇する範囲では顕著な違いが生じるものの、その届かない上層部では洪水位の上昇も下降も関係なく濃度分布が形成されているのである。このことが持つ意味は大きいものといわなければならない。今回のような小洪水では、上層と下層という明瞭に区分できる二つの層が存在し、底面に比較的近い下層部分においてのみ、上昇期・下降期の乱流特性が違っていること――“まき上がり水流”が支配的になっていること――を物語っている。このことも木下によって指摘されているのであるが、上野(1983)もまた乱流構造の階層性・多重性を強調している。下層は、洪水規模の増大とともに厚くなり、ついには水面に達するものと考えられる。このとき、“まき上がり水流”が水面に現れ「湧き返るような」ボイルで覆われるのであろう。なお、図-11、12 の上層部の分布は、Rouseプロットによく乗っている。

5. 乱流計測の結果

前節で述べた乱流構造の二層性を、なんとか流速計でつかまえないというのが計測の狙いであった。しか

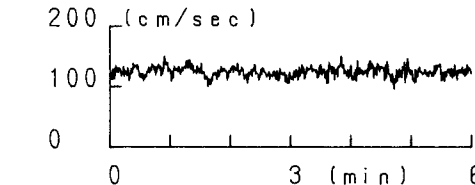


図-13 9月4日20:40-水面下7mにおける合成流速信号

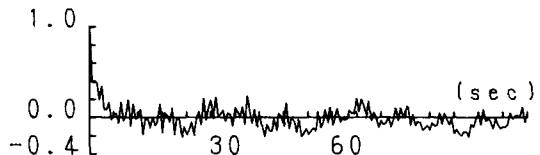


図-14 同左図の自己相関

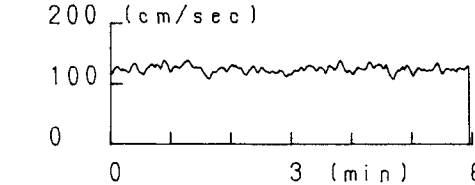


図-15 重み付き移動平均後の系列

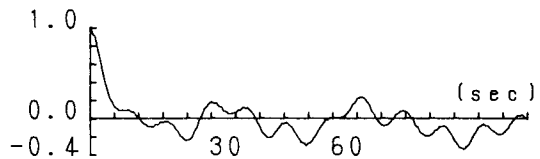


図-16 同左図の自己相関

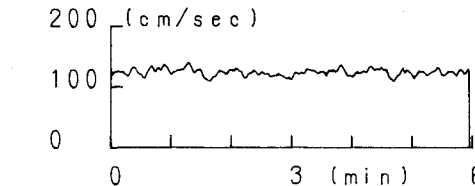


図-17 周期分除去後の系列

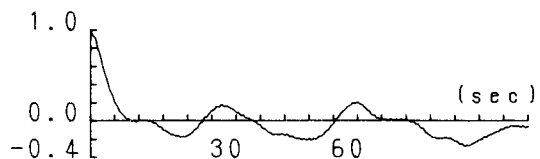


図-18 同左図の自己相関

し、得られたデータには原因不明の周期成分が入り込んでおり、現在までに解析し切れていない。以下に、データの性質と検討した結果について述べる。図-13 は、4日20:40-50にかけての水面下7m（底面近傍）の計測信号である。一見したところでは正確なデータのように見えるが、自己相関（図-14）に見られるように、この系列には1.6秒、1.4秒、1.2秒などの周期成分が入り込んでいる。電磁流速計やワイヤーロープが生み出すカルマン渦の周期は、それぞれ0.4秒、0.03秒程度と考えられ、これらが原因ではない。逆に考えると30cm程の円柱状のもとで生ずる渦周期ということになるが、対応するものは考えられない。そこでこれらの周期を消しさるために、重み付きの移動平均をおこなった。結果は、図-15 のようになる。スペクトル解析によると、この系列にはなお9.6秒の不自然な長周期の波が混入しているようである。これを先の系列から直接除くと、図-17 のようになる。対応する自己相関は図-18 である。この図およびスペクトルをみると、低周波側に36秒、16.6秒の二つの卓越波が残されていることがわかる。同様の操作を水面下1.5mのデータについて施し比較すると、18秒という卓越波だけが低周波側に残る。これは、底面データにおける卓越周期の半分で、その第二ピークの周期16.6秒に近い。底面におけるデータは、表面近傍データに新たに36秒の長周期は加わったかにみえる。Jacksonによれば、コルク・ボイルの平均周期 T は、 $T \cdot U / \delta = 7.6$ （ U :外部流速、 δ :境界層厚）によって表される。いま、 U を表面流速に、 δ を水深にとれば、ボイルの周期は51秒ほどになるが、 δ をまき上がり水流の最大高5mにとり、その場の流速1.2m/sをあてると、 T は32秒ほどになる。底面データの長周期分は、この周期に近い。しかし、これが意味のあるものか否かは、現在のところほとんど判断できない。

6. あとがき

電磁流速計は、河口の感潮流計測などでかなり広く用いられており、一部ではレイノルズストレスの計測にも成功しているようである。しかし、洪水計測の例は見あたらず、その手法の確立はそれだけで大きな問題である。流速測定では、流速計の固定ということが鉄則であるが、水深が10mを越え多量のゴミが流れてくる場所でそれを行うことは至難である。簡便で確実な方法を考えたい。今回、浮遊砂の分析から明らかになった流れの二層性を、乱流の立場から把握することができれば洪水流の理解を深めることができるであろう。

謝辞：本研究は、平成2年度文部省科研費総合A「種々のスケールにおける流れと流砂運動の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明」（代表芦田和男）による補助を受けておこなわれた。また、木下先生より貴重なご指導助言を、シン航空から有用な援助を頂いた。末尾ながら記して深謝する次第である。

参考文献

- 上野鉄男(1983):開水路の大規模乱流構造と河床波に関する研究、京大学位論文
- Coleman, J.M. (1969): Brahmaputra River: channel processes and sedimentation, *Sediment. Geol.* 3, 129-239
- 伊勢屋ふじこ・池田宏(1986):洪水時における砂堆の発達にともなう浮遊砂濃度の変化、第30回水理講演会論文集、505-510
- 板倉忠興(1984):河川における乱流拡散現象、北大学位論文
- Jackson, R.G. (1976): Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *J.F.M.*, vol. 77, part 3, 531-560
- 吉川秀夫(1954):洪水時の河川浮遊砂量の変化について、建、土建報告、No. 87
- 木下良作(1984):航空写真による洪水解析の現状と今後の課題、土木学会論文報告集、第345号、II-1、1-19
- 木下良作(1989):洪水時の砂床形態の変化、第33回水理講演会論文集、439-444
- 木下良作(1990):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、水工学論文集、第34巻、463-468
- Mattes, G.H.: Macro turbulence in natural stream flow, *A.G.U.*, vol. 28, No. 2, 255-265
- 中川博次・禰津家久・松本利典・金沢文彦:開水路河床上の乱流構造と組織渦に関する研究、第33回水理講演会論文集、475-480