

II-42

洪水流実験における流速分布と浮遊砂濃度の変化

北海道大学 学生員 市 埜 順也
 北海道大学 正 員 長谷川 和 義
 北海道開発局 正 員 加 治 昌 秀
 北海道開発局 正 員 渡 邊 康 玄

1. はじめに

洪水流、すなわち非定常流における流速分布、浮遊砂底面濃度及び分布、河床変動に関しては不明なところが多い。これまで著者らは石狩川、豊平川、雨竜川などにおいて洪水時の流速及び浮遊砂濃度を測定し、その特有な現象の発見に努めてきた。しかし、現地観測の実行の有無は天候に左右され、さらに有意義な計測データを入手できる洪水の発生は少なく、思うようにデータを収集する事は非常に困難であった。そこで今回、現地計測のほかに室内実験を行い、それによって非定常流における不明な点を解明しようとしてみた。本研究はその実験の結果をもとにして、我々が今まで現地計測から得てきた研究成果を適用して洪水流を解明し、並びに新しい現象を発見することを目的としたものである。実験に際しては昭和56年に尻別川で起こった洪水のハイドログラフを基にした。実験概要、結果などは以下に述べる。

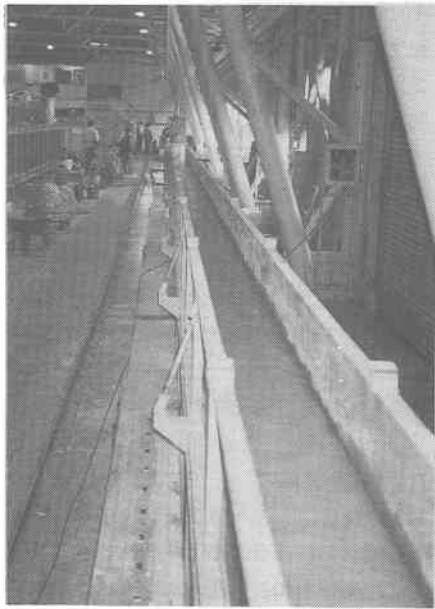


写真 1 実験水路の様子

2. 実験の概要

(1) 測定器具と測定法

今回の実験は開発局土木研究所の幅30cm、長さ50mの直線回流水路を使用して行った。河床には、下流で厚さ約9cmで勾配が1/1200となるように粒径0.0053cmの珪砂を敷き詰めた。流速、水位の測定を行い、さらに浮遊砂採取のための採水を行った。水位計は計5台を上流水槽と上流から20m、27m、33m、45m、の位置に設置し、全通水時間を通じて測定を行った。流速は上流から約27mの位置で2次元電磁流速計を水深方向に移動して、8タイムシリーズにわたって測定した。また、2次元電磁流速計1台、3次元電磁流速計2台、超音波流速計2台を使用し、28m~30mの地点で徐々に高さを変えて、通水の間中定点測定した。浮遊砂濃度は、河床から0.5cm, 1.0cm, 1.5cm,19cmまで、管径5mmのサイフォンを利用して採水した。

(2) 実験条件と水路図

1節でもふれたように、実験は昭和56年の尻別川洪水に基づいて行った。基底流は、尻別川の融雪時の流量及び水深を使用した。表1は基底流の条件をまとめたものである。図1は今回用いた実験水路の概略図である。水位計の設置位置と採水位置、並びに流速測定位置が図中に示されている。

表 1 実験の条件

基底流量	水深	河床勾配	粗度係数	粒径	通水時間
Q(m ³ /sec)	h(m)	I	n	d(cm)	t(sec)
0.0043	0.065	1/1200	0.021	0.0053	15000

An Experimental Study on Velocity Profiles and Suspended Sediment Concentration under the Unsteady Flow in a Channel

by Junya Ichino, Kazuyoshi Hasegawa, Masahide Kaji, Yasuharu Watanabe

3. 実験結果

(1) 水位、流量ハイドログラフ

非定常流実験は、表1に示されている基底流4.3(1/sec)を約3時間流し、河床が安定して定常状態となった後、昭和56年尻別川洪水のハイドロに従って流量を変化させることによって行った。尻別川洪水の実験用縮尺ハイドログラフを図2に示す。15000秒(約4時間)かけて洪水流を再現したことになる。水路上の5点の水位観測点における水位変化を、図3に示す。後述の不定流計算の結果も共に載せている。図7は、水深と水面勾配の実測値の時間軌跡を描いたものである。実際の洪水の場合、このループは反時計回りを示すが、本実験では時計回りに

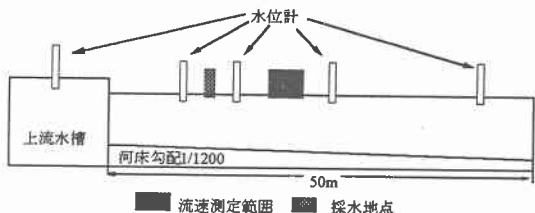


図1 実験水路概略図

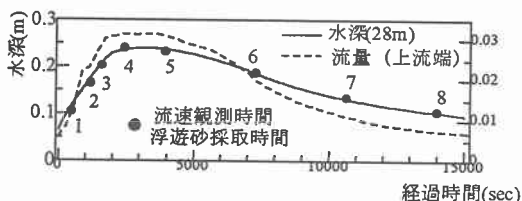


図2 実験に用いた尻別川の縮尺ハイドロ

なっており、洪水流の再現という点では難点を持つこととなった。この原因としては、下流端の開放ゲートによる堰上げの影響が考えられる。

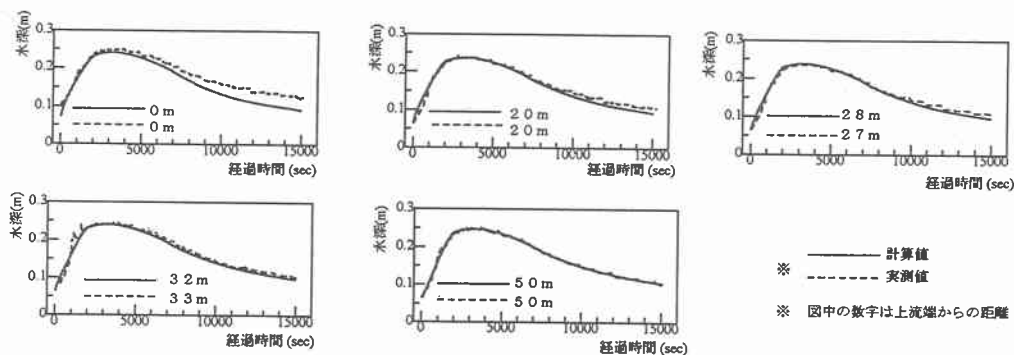


図3 水深の時間変化

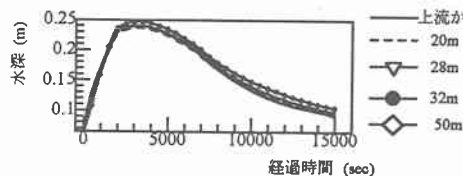


図4 水位観測点の水位変化図

図5 時間毎の水深の値

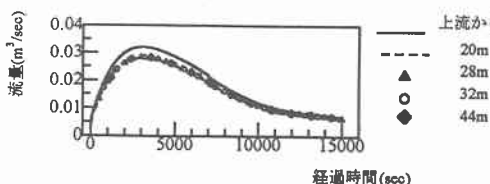
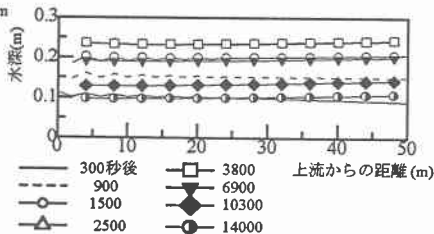


図6 流量の時間変化

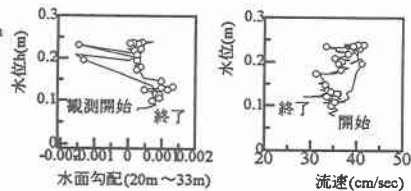


図7,8 水深と流速、水面勾配の関係

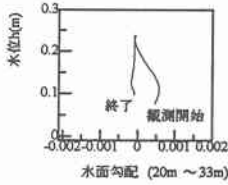


図9 水深と水面勾配

(3) 流速分布

図2中に黒丸で示したシリーズ番号は、採水と流速分布の測定時間を表している。ここでは、流速分布の測定結果を示す。図2のハイドログラフから分かるように、シリーズ1からシリーズ4までが水位上昇期、シリーズ5からシリーズ8までが水位下降期である。

流速データの値は、流量及び水深から求まる平均流速に比して約20cmほど小さめの値を示す。これは流速計の0点のずれによるものと考えられるが、流速の分布形自体は正しく現れているものと判断される。以後この立場で解析を進める。図8は水深と流速（固定電磁流速データ）の時間軌跡を示すものである。この結果は明瞭な反時計周りの分布を描いており、通常の洪水計測結果に一致している。

(4) 浮遊砂濃度分布

図11に浮遊砂濃度分布の計測結果を示す。シリーズ番号は流速測定と同一である。シリーズ4において、水位がピークに達し、濃度のピークもこのときに現れている。現地計測では、濃度のピークが水位ピークよりも前にくるのが普通であり、このように水位ピークと同時に現れることは意外な結果である。これに対する検討は次節において行う。

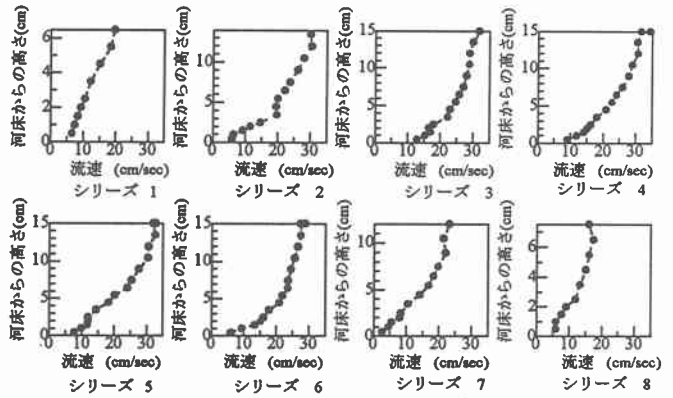


図10 シリーズ毎の流速分布

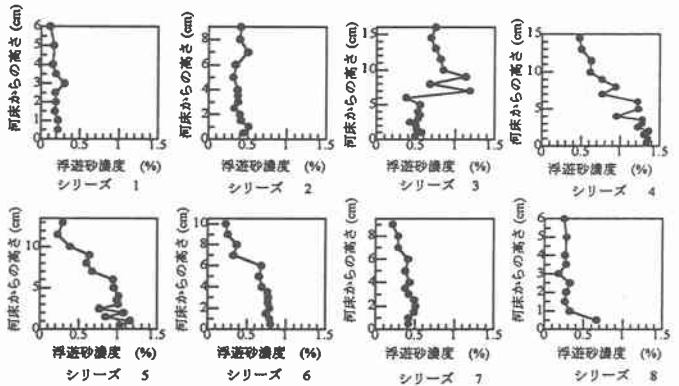


図11 浮遊砂濃度分布

4. 解析

(1) 不定流計算

河床せん断力を求めるために不定流計算を行った。使用した差分式はTwo-Step Lax-Wendroff法である。基底条件は表1のものを使用し、 dx は2m、 dt は0.2秒とした。境界条件として上流端で尻別川の縮尺流量ハイドログラフ、下流端で、下流端から5m上流側に設置した水位計のデータを使用した。計算結果と5地点の水位データとの比較が図3である。実測水位と計算値はよく合っている。上流端の不一致は、水位計が水路の上流端より2mほど上流の水槽の中にあることによる。従って、計算結果を実際の水位変化と同様であると見なしでも差し支えないように見える。しかし、図9の様に水深-水面勾配の関係を見ると、反時計回りになっており、微妙な水面勾配の再現までは果たしていない。

(2) 河床せん断力の変化

(1) の計算結果を使用して河床せん断応力を求めた。河床せん断力は次の式で表される。

$$\tau_0 = \rho g \frac{n^2 Q^2}{B^2 h^3} \dots\dots\dots (1)$$

結果を図12に示す。同図中には、水深の時間変化が併記されており、両者が比較できる。河床せん断力は上流から下流に依ってピークの相対的な値が大きくなっている。また、河床せん断力のピークが水位ピークより早く現れており、実際の河川で観測される現象によく合っている。しかし、先述の水面勾配の推定における難点を考慮すると、この結果が了承し得るものか判断が難しい。

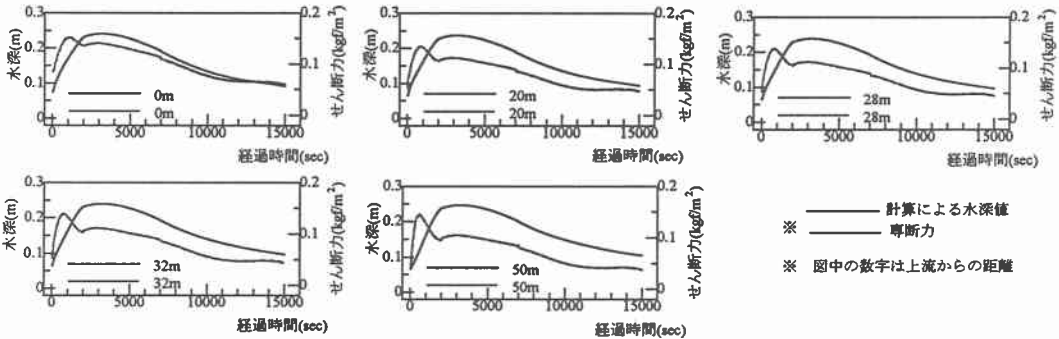


図 12 せん断力の時間変化

(3) 流速分布の検討

著者らのこれまでの研究によれば、洪水時の流速分布は、式 (2) の様なLegendre型の微分方程式で表される可能性がある。

$$(1-y^2) \frac{d^2 \phi}{dy^2} - 2y \frac{d\phi}{dy} + n(n+1)\phi = f \dots\dots\dots (2)$$

$$n(n+1) = \frac{1}{\kappa Fr \sqrt{i_r}} \left[3 \left(\frac{c}{U} - 1 \right) \left(\frac{1}{U} \frac{dh}{dt} \right) Fr^2 + 4(i_r - I) \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$f = \frac{1}{\kappa Fr \sqrt{i_r}} \left[\left(\frac{c}{U} - 1 \right) \left(\frac{1}{U} \frac{dh}{dt} \right) Fr^2 + I - 2i_r \right] \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\phi = \frac{u-U}{U}$, $y = 1 - 2\frac{z}{h}$, Fr =フルード数、 i_r =摩擦勾配、 U =断面平均流速、 c =洪水伝播速度、 u =任意水深流速、 I =水面勾配、 κ =カルマン係数、 h =水深。

現地計測ではパラメータ n, f の中には、正確な値を知ることが難しい項が含まれている。今回の実験では、各時間毎に水位データが測定されているので、これらの値を正確に知ることができる。しかし、 n, f 中のすべての項に値を代入して、Legendreの微分方程式の解に当てはめても、理論値は実測値に対してかなりはずれる結果となってしまう。そこで図13のように実測値に合うようにパラメータ n, f の値を決め、この n, f と実測値の代入によって得られた n, f を比較すると図14のようになる。これを見ると、 n については水位上昇期で互いの値が近く、 f については下降期で両者が近づいている。計算値による推定水面勾配や摩擦勾配の使用、実測流速分布の信頼度など、式(2)~(4)の成立性を検討するには今回のデータは、精度不足であり、これ以上の言及は避けることとする。

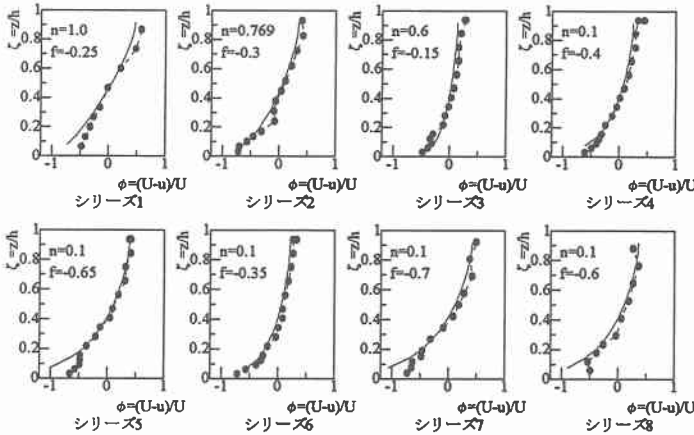


図 13 流速分布の実測と理論線との比較

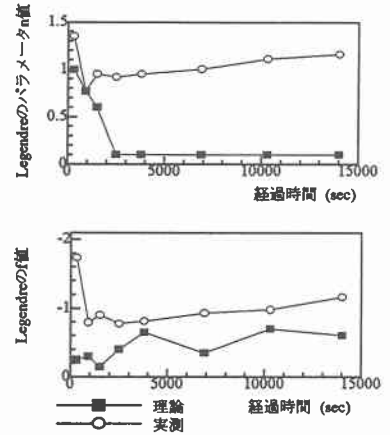


図 14 パラメータの比較図

(4) 浮遊砂底面濃度

縦軸に浮遊砂底面濃度、横軸に摩擦速度 u_* を沈降速度 w_0 で割ったものをもってシリーズ毎にプロットすると、図15のようになる。なお、沈降速度はRubeyの式によって導き出した。この図を見ると水位がピークの際に浮遊砂底面濃度が最大になっている。しかし、一般に浮遊砂濃度は河床せん断力、即ち摩擦速度が最大の時に最大になることが知られているが、この場合はそれに従っていない。また、通常この図の軌跡は時計回りになるはずであるが、この場合には反時計回りになっており、後述の問題が関わっているように判断される。

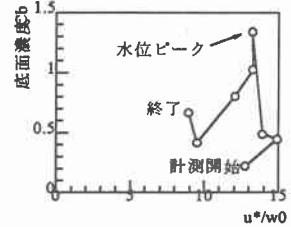


図 15 摩擦速度と浮遊砂の関係

(5) 浮遊砂濃度分布

シリーズ毎の浮遊砂鉛直濃度分布の性質を調べるために、図16に式(5)によるRouseプロットを試みた。同図中には、吉川・福岡のウォッシュロードによる水面濃度を境界条件として与えた分布式(6)を併記している。これらによれば本実験の分布はRouse分布からかなり外れ、むしろ、吉川・福岡式に従って、水面まで高い濃度を保っていることが分かる。浮遊砂のかなりの部分がウォッシュロードとなって流下していることを示すものであろう。以上から、考えられることは、供給砂の過剰なウォッシュロードが沈降するよりも早く観測地点に到着して計測濃度に影響を与えることである。(水深/沈降速度)×平均流速によって到達距離を評価すると、シリーズ2からシリーズ7までは上流水槽のウォッシュロード濃度の影響を無視できないことになる。回流方式の本実験では、流量が大きくなるほどウォッシュロード濃度が高くなることになり、前述の問題に一応の説明が付くこととなる。

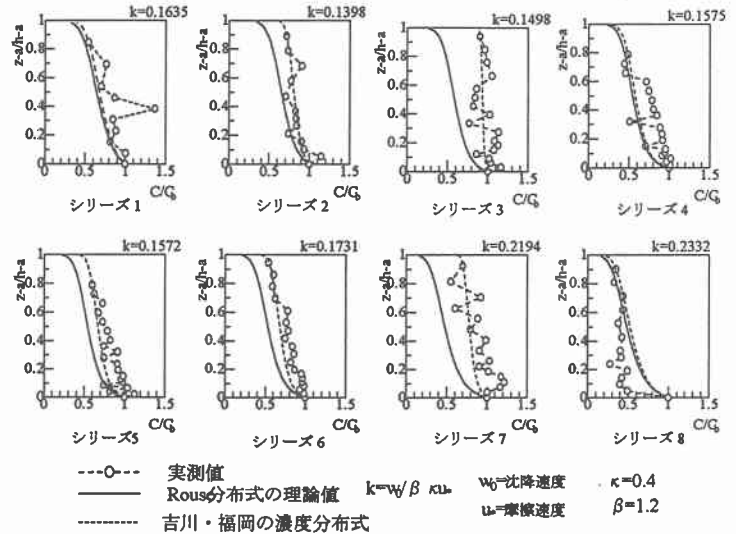


図 16 Rouse 濃度分布式との比較

$$\frac{C}{C_s} = \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^k \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{C}{C_s} = \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^k + \frac{\frac{C_b}{C_s} - \left(\frac{h-b}{b} \frac{a}{h-a} \right)^k}{\left\{ \left(\frac{h-b}{b} \frac{a}{h-a} \right)^k - 1 \right\}} \left\{ \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^k - 1 \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $k = \frac{w_0}{\kappa u_*}$

w_0 は砂の沈降速度、 u_* は摩擦速度、 a は浮遊砂底面濃度の採取位置、 b は水面近傍の浮遊砂採取位置である。

5. まとめ

尻別川昭和56年洪水を模した移動床洪水流実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 上流端で流量ハイドログラフを与えることで、実現象に近い洪水波動を発生させることができた。しかし、水面勾配が水位上昇期で小、下降期で大となる通常の洪水とは逆の結果になった。下流端の堰上げの影響が考えられた。
- 2) 固定した流速計の値は上昇期で大、下降期で小となる。通常の洪水流の性質を示した。しかし、流速分布は水位上昇期で瘦せた分布に、下降期では丸まった分布になり、一般に考えられているものとは逆になった。
- 3) 浮遊砂濃度は水位ピーク時にピークを示し、これも通常の洪水とは異なる結果となった。また、分布形状はRouse分布に従わず、ウォッシュロードを加味した吉川・福岡式に近いものとなった。このことから、ウォッシュロードの影響が大きいことが知られた。
- 4) 回流方式の実験では、上部水槽におけるウォッシュロードの濃度が計測にかかる可能性がある。水位ピークにおいて濃度ピークが生じる一原因と考えられる。
- 5) 不定流計算によって、水面勾配など微妙な値を推定するには十分精度を上げる必要がある。
- 6) 不定流計算による河床せん断力の時間推移では上昇期にピークが現れるが、実測の流速分布も浮遊砂濃度もこれに対応しない。これらについては計測そのものと、計算精度の両方に問題を有していることが判明した。

参考文献

- (1) 渡邊 康玄、石田 享平、井出 康朗：樹木郡内の流速水深方向分布と浮遊砂濃度分布、開発土木研究所月報 No502 1995
- (2) 市埜 順也、長谷川 和義、清水 康行：洪水時に特有な流速分布に関する研究、土木学会北海道支部論文集 第51号(B) 1995
- (3) 吉川 秀夫：流砂の水理学、丸善株式会社 1985
- (4) 川村 三郎：土砂水理学1、森北出版株式会社 1982
- (5) 土木学会編：土木工学における数値解析（流体解析編）、サイエンス社 1974