

平成9年8月鶴川洪水における現地観測の結果とその解析

開発土木研究所 正会員 鳥谷部 寿 人
開発土木研究所 正会員 山下 彰 司
開発土木研究所 正会員 喜澤 一 史
北海道大学大学院 正会員 長谷川 和 義

1. はじめに

河川管理を行っていく上で、水収支及び土砂収支等を明確に把握することは重要である。しかし、既往の観測では河床波、流れの内部構造、浮遊砂、掃流砂等の詳細なデータが不足しており、水理学的な理論解析や実験的考察の検証例は少ない。特に河床波と浮遊砂濃度、洪水流の内部構造については個々の現象が互いに関連しており、洪水時のような非定常流れの水理構造が土砂移動に及ぼす影響を示した現地データは少ない。一方で近年の計測機器の進歩に伴い、新たな測量や現地観測手法が開発され、洪水出水中の流速分布や土砂移動などの観測を行うことが可能となってきた。

本研究では最新の観測機器 (MTS:Multi Tubes Sampler) を用いて浮遊砂の精密観測を実施し、その水深方向濃度分布の計測結果に基づき、既往の浮遊砂濃度分布の理論値との適応性について検証した。さらに観測時の推定浮遊砂量について検討し、これらが洪水時にどのように変化するかについて検討することを目的とした。

2. 観測概要

平成9年8月9日～10日にかけて北海道付近に発達した前線と台風11号により北海道南部を中心に大雨が記録された。今回の調査対象河川である鶴川でも流域平均雨量135mmの降雨を記録した。鶴川は流域面積1270km²、全長135kmの一級河川である。観測地点は鶴川中流域の穂別橋地点(kp40.8)であり、すぐ上流で穂別川が合流している。この洪水では穂別水位観測所において警戒水位55.5mを1m近く上回るピーク水位56.47mを記録した。また、浮子による流量観測結果から約1300m³/sもの流量を記録した。鶴川では平成4年8月9日に同水位観測所においてピーク流量2235.15m³/sの大出水があり、大量の流木と土砂が流出して被害を起こしており、今回も大量の流木や土砂が流出した様子が観測された。

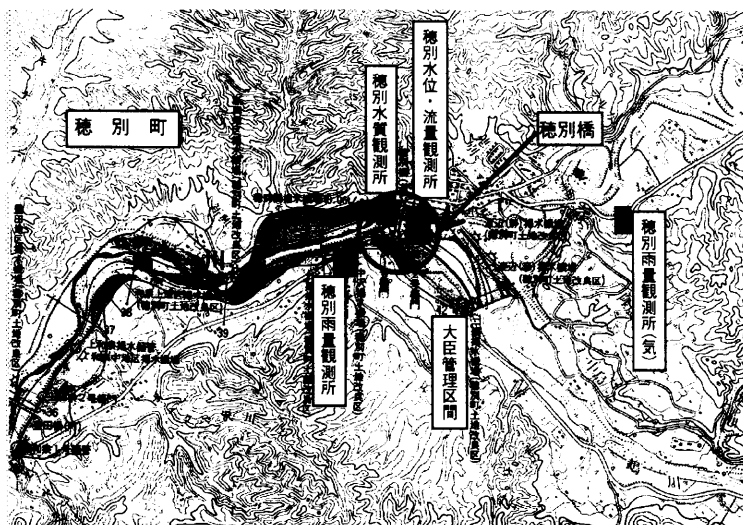


図1 穂別橋周辺の平面図

洪水時の浮遊砂量の変化を算定することを目的として、浮子による流量観測、流心付近において土研式掃流砂採砂機による掃流砂観測、MTSによる深度別浮遊砂観測、およびバケツを用いた水面近傍の浮遊砂観測をハイドロの立ち上がりからピーク後にかけて行うこととした。図1は観測地点である穂別橋付近の平面図である。図2は平成9年8月9日～10日の水位・流量ハイドログラフと浮遊砂濃度の経時変化である。

The Results of Field Measurement and Analysis on September 1997 Flood of The Mukawa River

by Toshihito TOYABE, Shoji YAMASHITA, Kazufumi KIZAWA, Kazuyoshi HASEGAWA

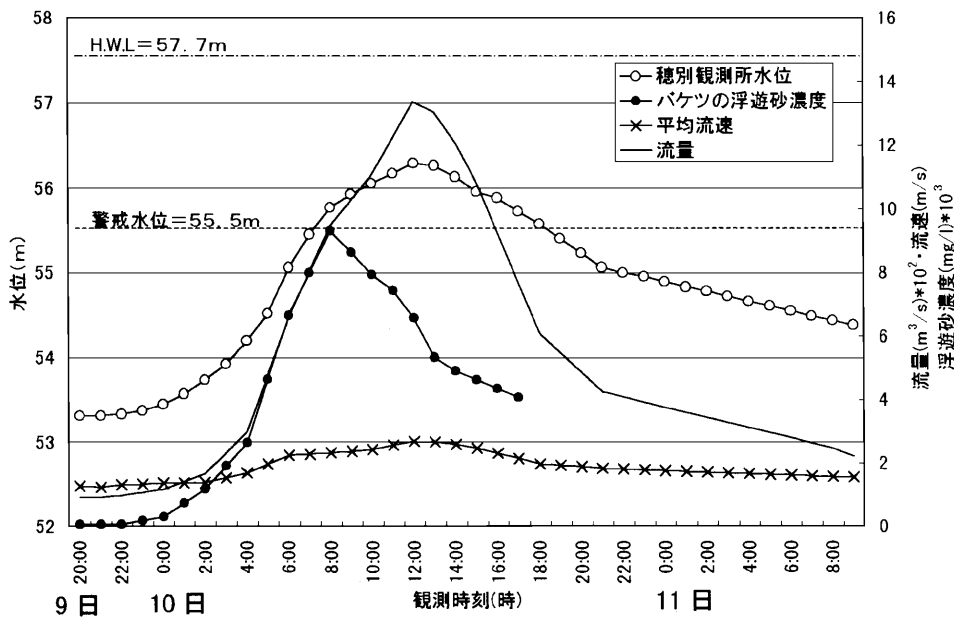


図 2 平成9年8月9日～11日のMTSの水位と流速、浮遊砂濃度の時間変化

浮遊砂の水深方向濃度分布を知るために、写真1に示すMTS (Multi Tubes Sampler)を使用した。これは、容量1ℓの円筒状のプラスチック容器に空気圧で開閉する蓋を取り付けたもので案内羽根と錘を付けてある。これを橋上から自動昇降装置を用いて降下させることでサンプリングの時間差を少なくすることができた。観測は洪水の立ち上がりから捕らえることができたが、10日4時に流量約300m³/sで流木など浮遊物の影響や流速の影響などで深度別にサンプラーを降下させることができず。その後はバケツによる水面近傍浮遊砂と浮子のみを観測をせざるをえなかった。

3. 浮遊砂濃度の観測結果

図2中の浮遊砂濃度(mg/l)はバケツによる水面近傍での観測結果であり、浮遊砂濃度を経時変化で見た場合、水位のピークの4時間前に浮遊砂濃度ピークが現れている。このことは市埜らりの室内実験で起きている現象が今回の洪水においても生じていることが証明された。表1は、MTSによる2:00、3:00、4:00の浮遊砂濃度分布の観測結果である。いずれもハイドロの立ち上がりの早い時間帯にとどまっているが、バケツ採水と同時に実施された。同時刻のバケツ採水とMTSによる水面近傍採水の浮遊砂濃度を比較したところ、いずれもMTSのほうが低く、バケツ採水の6～7割程度の濃度であった。これは、MTSが浮遊砂を瞬間的に採取するのに対し、バケツの場合、流れに逆行して採水するために、バケツの底に浮遊砂が沈殿し、濃度が高くなる傾向にあるものと思われる。



写真1 MTS

表 1 MTSの浮遊砂濃度分布

採水時刻	採水深度 (cm)	浮遊砂量 (mg/l)	採水時刻	採水深度 (cm)	浮遊砂量 (mg/l)	採水時刻	採水深度 (cm)	浮遊砂量 (mg/l)
2 : 0 0	0	7 0 5	3 : 0 0	0	1 2 4 0	4 : 0 0	0	2 0 9 0
	1 5	8 1 0		1 5	1 2 0 0		2 0	1 9 8 0
	3 0	1 1 9 0		3 0	1 2 5 0		4 0	2 0 5 0
	4 5	7 5 2		4 5	1 3 9 0		6 0	2 0 8 0
	6 0	7 3 0		6 0	1 5 5 0		8 0	2 3 8 0
	7 5	1 2 6 0		7 5	1 6 4 0		1 0 0	2 1 6 0
	9 0	1 1 8 0		9 0	1 6 4 0		1 2 0	2 3 0 0
	1 0 5	9 3 7		1 0 5	1 5 0 0		1 4 0	2 1 9 0
			1 2 0	1 6 9 0				

4. 解析

4-1 浮遊砂濃度の検証

Rouse²⁾は流速分布に対数則を仮定し、洪水中も乱流構造は変化しないという仮定に基づいて浮遊砂濃度分布を式(1)で提案している。

$$\frac{C}{Ca} = \left(\frac{a}{h-a} \cdot \frac{h-z}{z} \right)^{\frac{W_0}{u_* \kappa}} \quad (1)$$

ここで、 C : 浮遊砂濃度、 Ca : 浮遊砂基準点濃度、 h : 水深、 z : 河床からの高さ、 a : 濃度の基準点高さ、 W_0 : 土粒子の沈降速度、 κ : カルマン係数、 u_* : 摩擦速度である。ここで Rouse の理論は多くの実験データによって検証されている事から、Rouse の浮遊砂濃度分布と実測の浮遊砂濃度分布との比較を試みた。この理論では、河床で境界条件を与える必要があり、底面濃度基準点を $a = 0.05 h$ と定義した。次に基準点濃度については板倉・岸³⁾により式(2)のように導かれている。ここで $A_7 = 0.0018$ 、 s = 土粒子の水中比重、 τ_* : 無次元せん断力である。また浮遊砂濃度は体積濃度で示した。

$$Ca = A_7 \left[\frac{0.14 u_* \Omega}{(1+s) \omega_0 \tau_*} - 1 \right], \quad \Omega = \frac{\tau_*}{0.143} \left\{ \frac{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} \right\} + 14\tau_* - 1, \quad a' = (0.143/\tau_*) - 2 \quad (2)$$

沈降速度は、Rubey³⁾式(3)によって求めることとした。

$$W_0 = \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd} \cdot F(d) \quad F(d) = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd^3}} \quad (3)$$

一方、MTS から粒度分析に必要なだけの試料が得られていない事から、別途洪水後に穂別橋地点において河床材料調査を実施した。試料は洪水後堆積したと思われる穂別橋直下流の砂州から表層より厚さ 12cm 程度の層 3 箇所から採取した。試料の粒径加積曲線を図 3 に示した。板倉・岸³⁾、芦田・道上⁴⁾らによれば基準点濃度 Ca と W_0/u_* 関係から $W_0/u_* < 1$ のとき、基準点において浮遊砂が存在していることが知られており、このことから、 $W_0 = u_*$ のとき浮遊限界の境界条件が決まるものとした。また、式(3)を用いて $W_0 = u_*$ のときには粒径を浮遊限界粒径 d_c として、この粒径よりも小さい粒子が巻き上がると考えた。なお、表 2 に MTS によって浮遊砂の濃度分布が観測された各時刻の u_* および d_c について示した。

表 2 u_* と d_c の関係

8月10日	$u_* = W_0$ (cm/s)	d_c (mm)
2 : 0 0	1 0 . 1 7	1 . 0 5 1
3 : 0 0	1 1 . 1 5	1 . 2 3 4
4 : 0 0	1 3 . 8 2	1 . 8 2 6

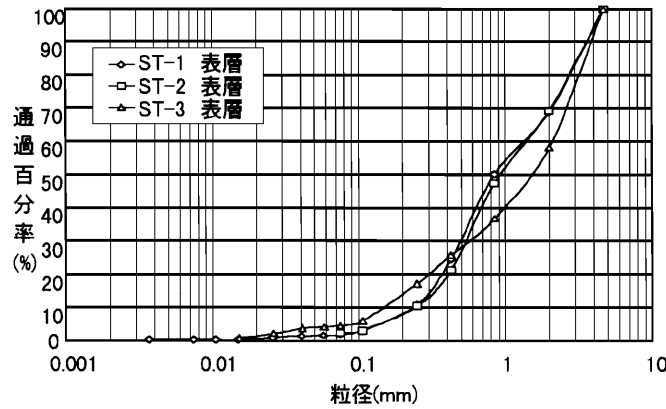


図3 粒径加積曲線

次に、洪水後の河床材料調査結果を基に表 2の浮遊限界粒径 d_c 以下の粒径についてそれぞれ粒度毎に Rouse の浮遊砂濃度分布を当てはめ、MTS の実測値と比較したのが図 4である。横軸は浮遊砂濃度 C 、縦軸は河床を0として水深で無次元化した高さ z/h で示してある。この図から実測値は直線的であり、Rouse の浮遊砂濃度分布と比較して必ずしも分布形が一致しているとはいえないが、浮遊砂濃度をオーダー的に比較した場合、適応可能であると思われる。これに基づいてMTSで計測できなかったハイドロのピーク付近の濃度分布について推定した。図 5は、横軸に8月9日20時から10日14時までのバケツによる水面の浮遊砂濃度 C_{sobs} をとり、縦軸に Rouse の浮遊砂濃度分布を仮定したときの同時刻の水理量から求めた水面の推定浮遊砂濃度 C_{scal} をとって比較したものである。

図 5によると両者の一致はかなり良いと判断できる。ただし、前節で述べたようにバケツ採水による浮遊砂濃度については高いものと考えられるので、6割の濃度で示してある。

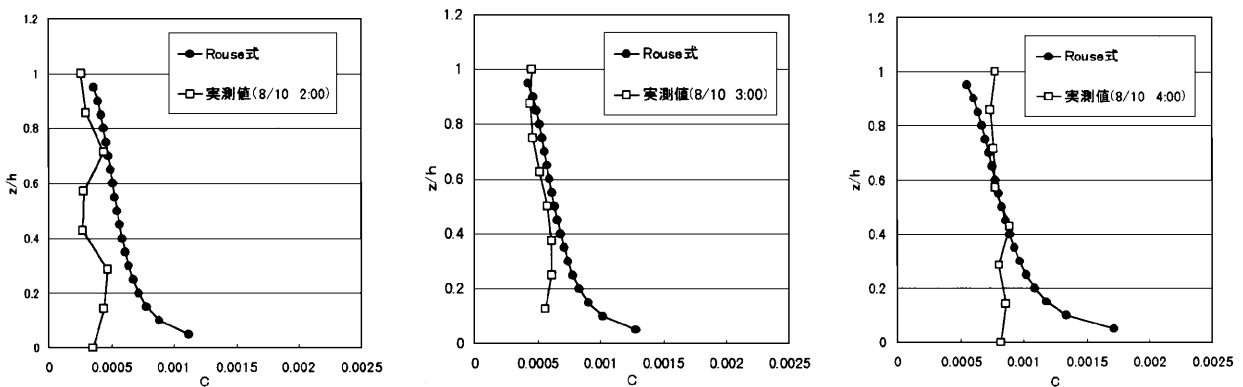


図4 浮遊砂濃度分布の比較

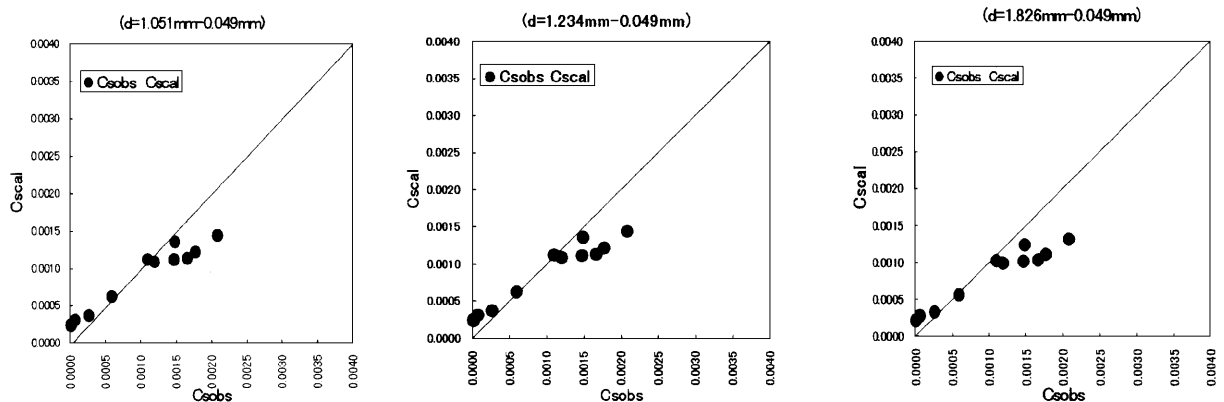


図5 浮遊砂水面濃度の比較

4-2 結果に基づく全浮遊砂量の推定

次に推定された濃度分布から今回の洪水観測における全浮遊砂量の推定を試みた。
定常2次元等流における単位時間当りの浮遊砂量 Q_c は(4)式で与えられる。

$$Q_c = B \int_a^h c(z) \cdot u(z) \cdot dz \quad (4)$$

ここに B ：代表川幅、 h ：水深、 $u(z)$ ：河床から z の高さにおける平均流速、 $c(z)$ ：河床から z の高さにおける濃度、 a ：濃度の河床からの基準点高さ、ここでは $a = ks$ 、 ks ：相当粗度を用いた。

$u(z)$ は対数則分布を仮定し、また、 ks に関しては喜澤ら⁶⁾が今回の鶴川洪水観測でADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)を用いて計測した実測の流速分布に最小二乗法を用いて対数則分布を当てはめた値を使用する。図6は横軸に時間軸をとり、縦軸に流量観測を実施した穂別橋下流断面における1時間毎の推定浮遊砂量、水位、流量について比較したものである。図6より推定浮遊砂量は水位、流量のピークより早くピークを迎えており、洪水時に普遍的に生起するとされる底面せん断力の先行現象が今回の洪水観測結果においても確認された。なお、浮遊砂量が10日15時、16時に再び増加しているが、この時は支川の穂別川上流で穂別ダムの放流が行われており、10日11時に最大約70m³/sの放流量に達した。ダム下流の稲里水位観測所で10日6時と12時の2回のピーク水位を記録していることから、この支川のダム放流の影響があると考えられる。

また、浮遊砂の粒径ごとに見ると $d_i = 0.049\text{mm}$ が卓越しており、今回の鶴川洪水観測時には浮遊砂の中でも特に細かな土粒子の全浮遊砂量に占める割合が高かったと推定された。さらに8月9日20時から8月11日9時までの全浮遊砂量について推定してみると約150,000m³もの浮遊砂が流出したことになる。

10日2時と10日4時に掃流砂が観測されており、同時刻の掃流砂と浮遊砂を比較した場合、穂別橋下流に流量観測用に測定した断面当り(2時で川幅約107m、4時で川幅約119m)の総量で比較すると、掃流砂がそれぞれ0.0000039m³/s、0.00043m³/sに対して浮遊砂がそれぞれ0.117m³/s、0.407m³/sであり、全流砂量に占める浮遊砂の割合は99%以上であり、今回の洪水に関していえば全流砂量のほとんどが浮遊砂であったものと推定できる。

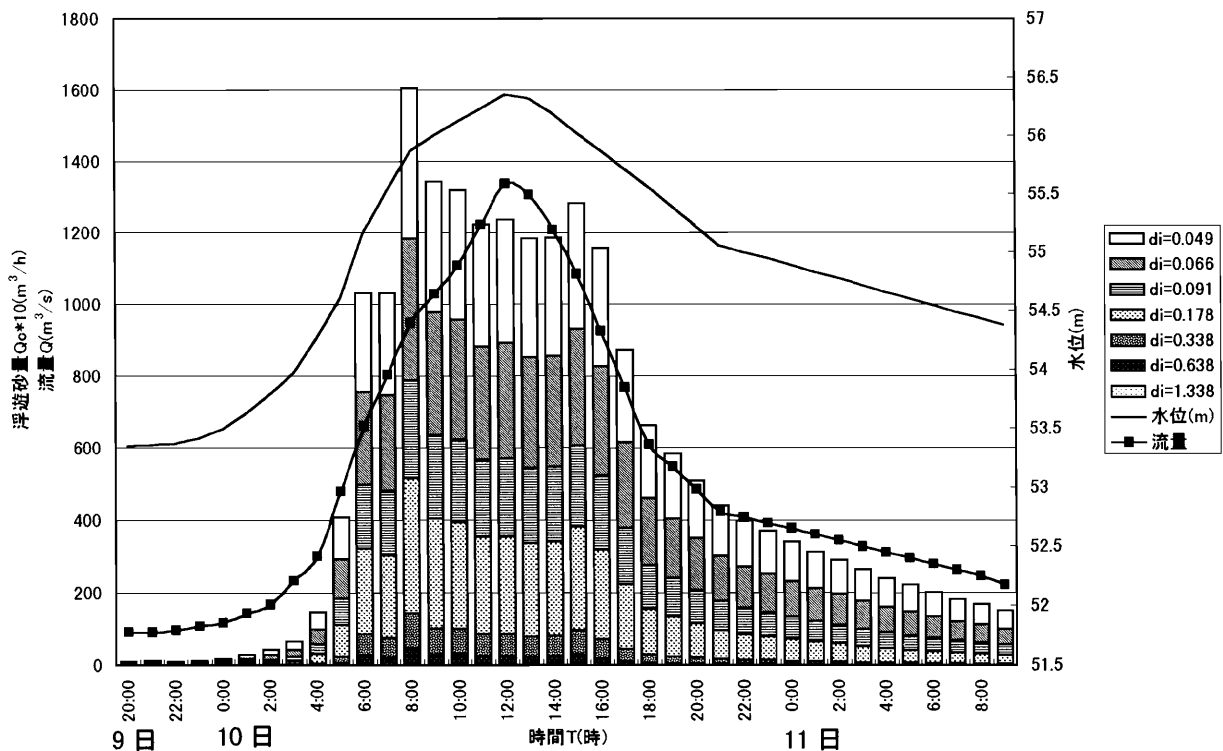


図6 推定浮遊砂量と実測水位・流量との比較

5. まとめ

平成9年鶴川8月洪水における現地観測を実施した結果、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 今回の洪水（ピーク流量＝1337m³/s(速報値)、洪水継続時間約 38 時間）で総浮遊砂量について推定した結果 150,000m³の土砂が流出していたと推定された。
- (2) 浮遊砂の流出土砂に占める割合は掃流砂と比較して圧倒的に高い。
- (3) 浮遊砂量のピークが水位・流量のピークより早めに現れた。したがって、洪水時の底面せん断力のピークが流量のピークの直前に現れる先行現象が計測によって実証された。

今後の課題として、今回調査を行った中で、洪水時の調査の難しさを改めて実感した。今後、洪水観測を行っていく中で、安全性を確保しつつ、簡単かつ確実な観測手法の検討を行っていきたい。

なお、本研究は開発土木研究所環境水工部港湾研究室、水産土木研究室、環境研究室そして河川研究室の共同研究課題の一環として取り組んできたものである。

参考文献

- 1)市埜順也、長谷川和義、加治昌秀、渡邊康玄：洪水流実験における流速分布と浮遊砂濃度の変化、土木学会北海道支部論文報告集第 52 号 B. 1996.
- 2)Rouse, H. , : Modern Conceptions of the Mechanics of Turbulence, Trans. ASCE, Vol. 102, 1937.
- 3)Itakura, T. , and Kishi, T. , : Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, Vol. 106, No. HY8, 1980.
- 4)芦田和男、道上正規：浮遊砂に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, 第 13 号 B, 1970.
- 5)Rubey, w. w. , : Settling Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles, Amer. Jour. Sci. Vol. 25, 1933.
- 6)喜澤一史、山下彰司、鳥谷部寿人、長谷川和義, : 洪水流における水理機能の変化について, 土木学会北海道支部論文報告集第 54 号. 1998 (投稿中)