

涸沼川におけるウォッシュロード の流下過程の解析

ANALYSIS ON THE PROCESS OF WASHLOAD TRANSPORT ON THE HINUMA RIVER

平林 桂¹・砂田憲吾²・大石 哲³・宮沢直季⁴・二村貴幸⁵

Katsura HIRABAYASHI, Kengo SUNADA, Satoru OISHI,
Naoki MIYAZAWA and Takayuki FUTAMURA

¹正会員 山梨大学大学院博士課程後期(櫛サンポー) (〒400-8511 甲府市武田四丁目3-11)

²フェロー 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田四丁目3-11)

³正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田四丁目3-11)

⁴正会員 工修 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田四丁目3-11)

⁵正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 (〒305-0804 つくば市旭1)

The authors conducted a set of survey on wash load transportation at the two sites in the Hinuma River, during a flood on June 19th, 1997, and found out a decrease in wash load concentration between the upper site(46.0km) and the lower site(28.1km). A numerical simulation was carried out to investigate causes of the decrease. CIP scheme was introduced to solve the unsteady advection-diffusion equation in the model of wash load transportation model. Results of the simulation show that the advection dominated and the diffusion did not in the process of the wash load transportation, and lateral outflow of wash load, which was caused by the trapping of vegetation, was one of the causes of the decrease in wash load concentration.

Key Words : Wash load, field observation, CIP scheme, advection, diffusion, 1-D simulation

1. 研究の目的

従来、河床変動計算は長期的河床変動あるいは洪水による局所洗掘・堆積の発達等を予測し、河川計画・管理に役立てるために実施されてきた。このため、予測の対象となる河床材料は、河床変動に直接寄与する掃流砂および浮遊砂に限られてきた。ところが近年の研究により、洪水時に河床と交換することなく流水とともに流下するのみと思われていたウォッシュロードが、実は河川微地形形成・河川環境形成に重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある。地形発達論としては、例えば藤田ら¹⁾²⁾³⁾は、洪水時において低水路を流下するウォッシュロードが高水敷に堆積し自然堤防などの微地形を形成するプロセスを現地観測および数値シミュレーションにより検討するとともに、ウォッシュロードの含有率が河岸の耐侵食強度に強く影響することを示している。河道内植生に関しては、例えば李ら⁴⁾は礫床河川において植生が繁茂・群落化するための条件のひとつとして、洪

水時における植生域への微細砂の堆積～保水性の向上が必要であるとしている。さらに、渡邊ら⁵⁾、戸田ら⁶⁾は、微細砂表面に付着し流下する栄養塩・有機物の存在が河川環境に影響を与えているとしている。以上の研究からわかるように、浮遊砂のみならず、流域におけるウォッシュロードの動態を把握することは、河川の地形変化のみならず、河川環境へのインパクト予測の面でも非常に重要である。

本研究においては、涸沼川において洪水時に採水法によるウォッシュロード観測を行うとともに、1次元数値解析を実施することで、洪水時におけるウォッシュロードの流下過程の基本的な特性、特に土砂収支、および移流・拡散の実態の解明を行った。特に後者の目的を達成すべく、ウォッシュロードの流下過程分析には数値拡散を生じないとされるCIPを導入し、移流と拡散の明確な分離に努めた。本論文は、この検討の内容、およびこの検討を通じて明らかとなったウォッシュロードの挙動、およびその数値計算手法に関する知見を示したものである。

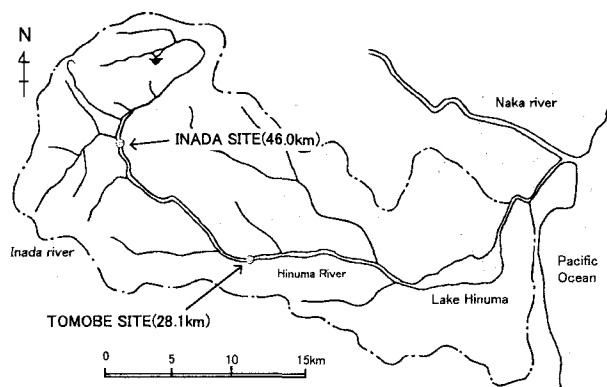


Fig.1 The Hinuma river basin

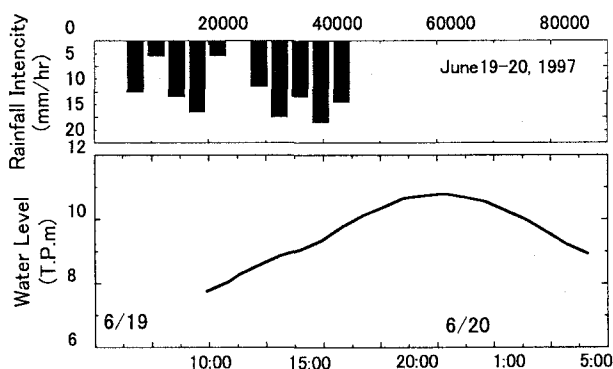


Fig.2 Hyetograph and hydrograph on June 19-20, 1997

2. 洪水観測の概要⁷⁾⁸⁾

(1) 流域の概要

Fig. 1に関東平野北部の河川流域図を示す。濁沼川は茨城県の中央部に位置する流域面積459km²、流路延長65kmを有する1級河川である。

流砂観測を実施したのは支川稲田川の合流点の下流である46km地点、およびそこから約18km下流の28.1km地点である。本論では、両観測地点をそれぞれ稲田地点および友部地点と呼称することにする。この間の河床勾配はおおよそ1/1000であり、この間に合流する支川はいずれも小規模であり洪水時の流砂特性に大きな影響を与えることはないと考えられる。

(2) 洪水の特徴

流域に最も近い雨量観測所である笠間観測所で得られた当該洪水時の降雨ハイドログラフ、および友部地点(28.1km)で観測された水位ハイドログラフをFig. 2に示す。降雨は12時～13時に一旦中断する二峰性のパターンであった。ただし、水位は一峰性となっている。ピーク水位はT.P. 10.79mであり、これは高水敷を水没させる規模である。

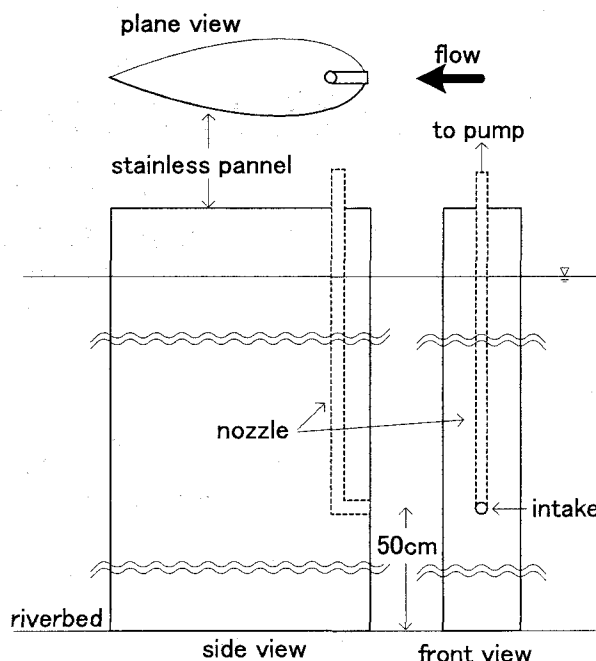


Fig.3 Column for wash load observation

(3) 観測方法

流量観測は友部地点(28.1km)でのみ実施された。計測方法は以下のとおりである。すなわち、洪水流中に浮子を投入し、45mの間隔において設定された2断面間を通過する時間を測定して流速を求めるとともに、水位観測値を用いて河積を算出し、これに流速を乗じて流量とした。流量観測は、洪水ピーク近くのみ毎正時に、その後の期間には2時間毎に実施した。

ウォッシュロードは、Fig. 3に示すような流線型の断面形状を持つ観測柱を河道内に設置し、河床から50cmの高さにあるノズルを通じ、ポンプで採水することにより得た。ノズルの入口は観測柱のよどみ点に配置されているので、流速と同じ速度で吸引すれば観測柱の影響をほとんどゼロとした状態での採水が期待できる。

採取した表面水は重量を測定した後乾燥させ、土砂のみの重量を測定し、先に測定した全重量で除すことによりウォッシュロード濃度を求めた。さらに、取り出した土砂に対しふるい分け試験および沈降試験を行い、粒度分布を測定した。これと、先に求めたウォッシュロード濃度から粒径別の濃度を推定することができる。

(4) 観測結果

Fig. 4に稲田地点(46.0km)、および友部地点(28.1km)で観測された粒径0.014mm以下の土砂濃度の時間変化を示す。この粒径範囲をウォッシュロードとしたのは、濁沼川の洪水時水理量からしてウォッシュロードとして輸送されることが確実であると考えられるからである。Fig. 4によれば、流下過程においてウォッシュロードのピーク値が、およそ840ppmから580ppmに減少しているこ

Table 1 Observation data

Time	TOMOBE Site (28.1km)			INADA Site (46.0km)
	Concentration (ppm.)	Discharge (m ³ /s)	Water Level (T.P.m)	Concentration (ppm.)
12:00	285.81	50	8.28	795.54
12:08	346.06			
12:57	505.20			
13:01	442.43	60	8.6	
13:08	267.43			
14:00	582.30	70	8.87	367.61
14:07	222.64			
14:17	490.76			
14:56	241.02			
15:00	248.32	77	9.06	524.45
15:11	288.64			
16:00		90	9.34	508.72
16:23	350.96			
16:40	234.86			
17:00		110	9.76	833.47
17:16	378.51			
17:20	168.94			
18:00	540.72	133	10.1	590.2
19:00	578.99	142	10.42	
20:00	523.75	144	10.64	259.08
20:59	388.92	143	10.77	
22:00	314.19	135	10.79	226.93
23:00	158.65	124	10.71	
0:00	95.55	118	10.54	127.97
1:00	77.80	110	10.29	
2:00	38.83	100	9.98	92.83

とがわかる。

なお、友部地点(28.1km)の濃度データの特に前半はばらついているが、この原因としては、ノズルにごみがつまっていたことが考えられる。事実、採取中に採水流量が急に低下したり、濃度が肉眼でも確認できるほどに低下することがしばしば発生した。よってこのデータは、極小値を棄却し上側に包絡するように見るのが望ましい。

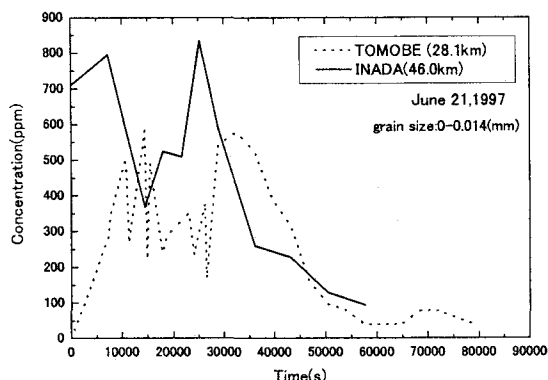


Fig. 4 Observed concentrations

3. 数値解析

(1) 数値解析の目的

洞沼川における洪水観測によれば、流下過程でウォッシュロードの濃度が下がる現象が確認された。この原因としては、流下過程での植生等による捕捉作用、あるいは拡散現象が考えられる。これを確認するために数値解析を実施する。数値解析は1次元解析手法に基づくものとする。特に、ウォッシュロードの拡散効果を明確に評価するためには数値拡散の生じないモデルが必要であるので、ここではCIPによりウォッシュロードの流下解析を行うものとする。

(2) 数値モデルの構築

稲田川合流点下流地点における流量・ウォッシュロード濃度観測値を境界条件とし、観測所地点におけるウォッシュロード濃度を予測するモデルを構築する。

流れの計算は、1次元の運動方程式と連続式を連立して解く(不定流計算・dynamic wave法)。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = -g \cdot A \cdot I_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここに、 Q : 流量、 A : 流積、 g : 重力加速度、 I_e : エネルギー勾配(ここではManning式に基づく)、 H : 水位である。時間積分法はMacCormack法とする。ただし、人工粘性項は付加していない。

ウォッシュロードの計算については、基本的には坊野ほか¹⁰⁾と同様、次に示す1次元の移流拡散方程式により解析する。

$$\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial (QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A\varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} \right) + B(E_w - D_w) \quad (3)$$

ここに、 C : ウォッシュロード濃度、 t : 時間、 x : 流下方向距離、 ε : ウォッシュロードの拡散係数、 E_w : 河床からの浮上フラックス、 D_w : 河床への沈降フラックス、 B : 水路幅、である。ただし、本検討においては、ウォッシュロードの定義でもある河床材料と混合しない性質を表現するために右辺第二項(生成項)を省略するとともに、上式を非保存型に書き換える。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A\varepsilon \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4)$$

非保存型に変形することによりCIPスキームを適用することが可能となる。

ウォッシュロードの拡散係数 ε は次式で与える。

$$\varepsilon = \gamma \cdot u_* \cdot h \quad (5)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度、 h ：水深、 γ ：ウォッシュロードの拡散に関する係数である。 γ は、従来の研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾によれば、0.1～0.3程度の値をとる場合が多いとされる。 ε には流れの渦動粘性係数が代用されることもある。

(3) 数値解析の手順

数値解析は、稲田地点が上流端、友部地点が下流端となるよう計算区間を設定し、境界条件として上流端で流量ハイドログラフ、下流端で水位ハイドログラフを与えることにより行うものとする。しかし、上流端である稲田地点(46.0km)では人員上の制約から流量観測が実施されなかったため、このままでは計算が実行できない。もちろん、稲田地点(46.0km)と友部地点(28.1km)の間でのウォッシュロードの収支を求めるという研究の目的を達成するためにも上流端での流量時系列が必要である。そこで、これを数値計算により推定することにする。その手順は以下のとおりである。まず、次に友部地点の流量観測結果を参考に、稲田地点での流量ハイドログラフを仮定した。次いで下流端の境界条件として友部地点の水位ハイドログラフを与えつつ不定流計算を実施し、友部地点における流量ハイドログラフを計算する。これが実測値と概ね一致するよう稲田地点の流量を調整した。

流れの計算において与えた諸条件をTable 2に一括して表示する。

Table 2 Computational conditions

Δt	Δx	Manning coefficient ⁽¹⁴⁾		
		channel	plain	paddy
10s	200m	0.040	0.045	0.025

ウォッシュロード濃度の計算は、上流端である稲田地点(46.0km)で実測された濃度時系列を境界条件に、流れの数値計算で得た諸水理を用いつつ実施した。

(4) 解析結果

a. 流況

友部地点における計算流量と実測流量の適合状況をFig. 5に示す。これによれば、両者は良く一致しており、上流端における流量ハイドログラフの設定が適切に行われたことを示している。

Fig. 6には不定流計算の結果得られた水位縦断の時間変化を示す。当該区間が一定勾配で川幅の縦断変化も比較的少なかったためか、時刻ごとの水面形の変化が少なく、不定流性の比較的弱い流況であることが知れる。

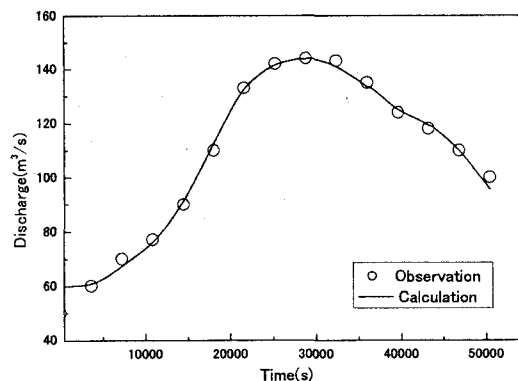


Fig. 5 Comparison between calculated and observed discharge at TOMOBE Site

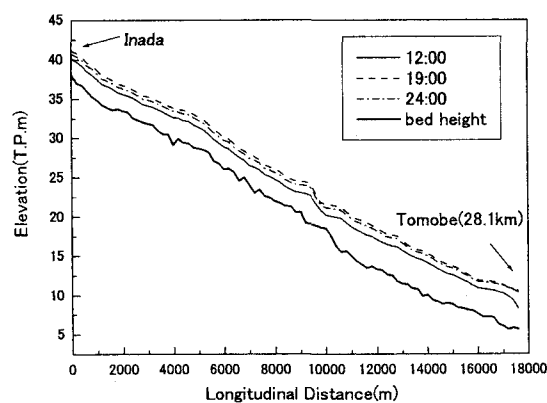


Fig. 6 Calculated water level

b. ウォッシュロードの移流・拡散

Fig. 7に友部地点(28.1km、計算の下流端)におけるウォッシュロードの計算値と実測値を併記する。図には、CIPスキームにおいて $\gamma=0, 100, 500$ としたケース、および参考として式(4)において拡散項を無視した移流方程式を風上差分法で解いたケースが重ね書きしてある。ここで用いた γ の値は、従来の研究成果に比べ著しく大きい。これは、このオーダーの係数を与えないと計算濃度に差異が現れないからである。

Fig. 7によれば、いずれのケースにおいても実測値よりも計算値のほうが大きな値をとっていることがわかる。また、各計算結果を比較してみると、大きな拡散係数を与えたケースほどピークが減少していることがわかるものの、ウォッシュロード濃度の波形全体を時間方向に伸張するほどの拡散効果は見られない。なお、特に計算の前半で計算値と実測値に大きな違いが見られる最大の原因は、上流端の境界条件として与えたウォッシュロード濃度実測値が、立ち上がり部分から観測されていないことが挙げられる。

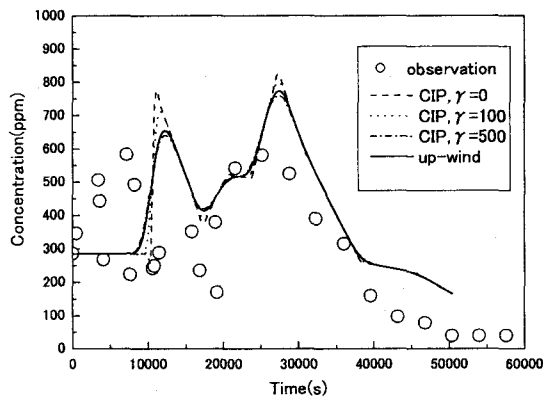


Fig. 7 Comparison between calculated and observed concentration of wash load at TOMOBE Site

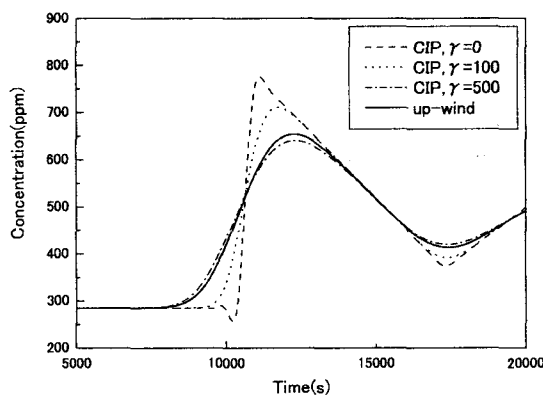


Fig. 8 Expansion of Fig. 7

Fig. 8は、Fig. 7の時刻10000秒から15000秒の時間、すなわち最初の濃度ピーク付近を中心に拡大表示したものである。このような解像度のもとでは計算結果ごとの違いが明らかになる。また、風上差分による計算結果は γ を100~500程度としたケースと概ね同等である。ここで、参考までにこの係数と数値拡散係数の関係について確認してみることにする。

数値拡散係数 D_n は次式で与えられる。

$$D_n = \frac{|u \cdot \Delta x|}{2} \quad (6)$$

これに当該計算における標準的な u_* (=0.171m/s)、 h (=3m/s)、 Δx (=200m)を与え、これが式(5)に一致するとして求めた $\gamma \approx 390$ とほぼ一致する。

従来の研究によれば、浮遊砂の場合一般に γ は0.1~0.3程度の値をとるとされる。ウォッシュロードの γ はこれより大きくなるとは類推されるものの、真値は数百

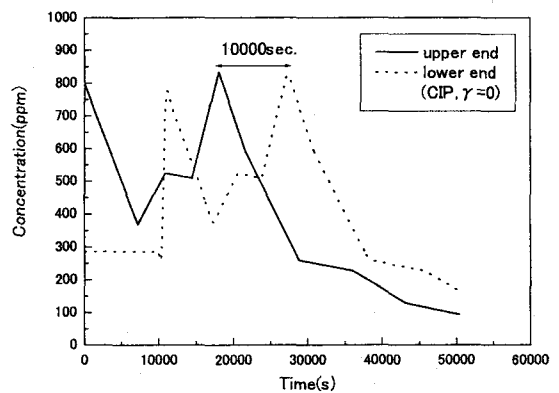


Fig. 9 Interval time between lower end and upper end

のオーダーをとるものではなく、従来の研究と同様1のオーダー以下であると考えるのが妥当であろう。とすれば、Fig. 8のような解像度でウォッシュロード濃度の移流・拡散を数値計算により予測しようとするならば、風上差分では問題があり、CIPのように数値拡散を起こさないスキームが要求されることを示している。

c. ウォッシュロードの土砂収支

b. の検討から、計算結果と実測値では計算結果のほうが大きな値を示し、しかも非現実的な拡散効果を導入してもその傾向は是正されなかった。このことは、本計算区間においてウォッシュロードの堆積がなされていることを意味する。堆積の原因を限定するのは本観測データの範囲では困難であるが、藤田らの研究¹⁴⁾によれば植生による捕捉が有力な原因の一つであると考えられる。そこで、ここでは全通過量のうちどの程度の割合のウォッシュロードが堆積しているか、実測値をもとに推定してみることにする。この検討を行うには上流端および下流端での一洪水におけるウォッシュロードの収支を調べるのが最も直接的といえる。

ある断面を通過するウォッシュロードの総量 W_{WL} は次式で表すことができる。

$$W_{WL} = \int_T Q \cdot C \cdot dt \quad (7)$$

ここに、 T は時間であり、洪水を含むなるべく長い時間を取ったほうが精度が向上する。しかし、当該観測においては洪水の立ち上がりを十分に捉えていないので、上流側で観測状況にあった適切な開始時刻と終了時刻を定め、この間のウォッシュロード総量を求める。また下流端で、流下時間を考慮した対応する時間で同様の作業を行いウォッシュロード総量を求める。流下時間については、Fig. 9に示すように上流端および下流端におけるウォッシュロード濃度の計算結果から約10000 [sec]と求められるので、これを反映した。すなわち、上流端で

は時刻12:00~23:10, 下流端では14:50~26:00のそれぞれ11時間10分を対象に式(7)に基づきウォッシュロードの総量を試算した。その結果, Table 3のように総量が求められた。これによれば, 稲田地点から友部地点までの約17.9 km区間で約20%のウォッシュロードが植生に捕捉するなどして横流出したことがわかる。

Table 3 Total weight of washload transport during the flood

INADA Site (46.0km)	TOMOE Site (28.1km)	RATE INADA/TOMOE
2222.2g	1779.1g	0.80

4. 結論

本研究を通じ, 以下の事項が明らかとなった。

- ①当該観測においては, ウォッシュロード濃度が流下するに従い減少する現象が見られた。その原因は主としてウォッシュロードの堆積であり, 縦断的な濃度拡散の影響はほとんどない。このことは, 例えば流域スケールでの土砂動態を調べる際, 流下過程では濃度不変, 支川の合流があれば足し合わせ等の単純化が可能であることを示唆するものである。
- ②ウォッシュロード濃度の流下に伴う変化を表す非定常移流拡散方程式を非保存型に書き換えることで, CIPスキームを用いた解析が可能となる。
- ③風上差分をウォッシュロード濃度解析に用いると, 非現実的な数値拡散が入るので, 例えば支川流入の影響やダム排砂の影響等, より局所な現象の解明には利用が好ましくない。CIPのような数値拡散のほとんどない高精度スキームの利用が必要となる。

謝辞

澗沼川における流砂観測資料は第一筆者が建設省土木研究所河川研究室に所属していた際に得られたものである。その当時から平館治氏(現独立行政法人土木研究所企画課)が主としてデータの解析を実施した。また, 現河川研究室室長の末次忠司氏には平館氏が河川研究室を異動後に資料請求等でお手数をお掛けした。

洪水観測は河川研究室全員, およびサポート役として(株)建設技術研究所の諸氏が実施した。貴重なデータは上記の方々の努

力の賜物である。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田光一・John A Moody・宇多高明: ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小, 土木学会論文集, 第551号 II-37, pp. 47-62, 1996.
- 2) 藤田光一・宇多高明・服部敦: 水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案, 土木技術資料37-12, p. 34-39, 1995.
- 3) 望月達也・藤田光一・平林桂・平館治: 新しい観点からの浮遊砂・ウォッシュロード観測の提案, 土木技術資料, VOL. 38, No. 10, pp. 20-55, 1996.
- 4) 李参熙・藤田光一・山本晃一: 礫床河川における安定植生域拡大のシナリオ—多摩川上流部を対象にした事例分析より—, 水工学論文集, 第43巻, pp. 977-982, 1999.
- 5) 渡邊康玄・新目竜一・斎藤大作・玉川尊: 鶴川1998年融雪出水時の物質輸送に関する調査, 土木学会水工学論文集, 第43巻, pp. 587-592, 1999.
- 6) 戸田祐嗣・池田駿介・熊谷兼太郎: 洪水流による礫床河川高水敷土壌および植生の変化に関する現地観測, 水工学論文集, 第44巻, pp. 831-836, 2000.
- 7) 望月達也ほか: 澗沼川における流砂観測, 水工学論文集, 第41巻, pp. 1011-1016, 1997.
- 8) 平林桂ほか: 洪水時広域採水観測による澗沼川水系の土砂動態モニタリング, 水工学論文集, 第42巻, 1998.
- 9) 藤田ほか: 澗沼川洪水観測レポート[2]1990~2000, 土木研究所資料第3798号, 284p., 2001.
- 10) 坊野聡子・清水康行・斎藤大作・吉田義一(1999): ダムを含む沖積河川の土砂輸送について, 水工学論文集, 第43巻, pp. 581-586.
- 11) Fischer, H. B. and Hanamura T.: The effect of roughness strips on transverse mixing in hydraulic models, Water Resources Res., AGU, Vol. 12, No. 2, pp. 362-364, 1975.
- 12) 池田駿介・泉典洋: 浮遊砂の横断方向拡散係数について, 土木学会論文集, No. 434/II-16, pp. 47-55, 1991.
- 13) 泉典洋・Gary Parker: 浮遊砂を有する礫床河川の平衡横断面形状, 土木学会論文集, No. 429/II-22, pp. 1-13, 1997.
- 14) 山本晃一ほか: 澗沼川洪水観測所レポート[1]1988~1989, 土木研究所資料第2895号, 1990.

(2002. 9. 30受付)