

洪水時における微細砂の縦断方向輸送

Longitudinal Transportation of Suspended Solids during Floods

佐藤耕治¹・渡邊康玄²

Koji SATO and Yasuharu WATANABE

¹正会員 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

In light of the fact that river life is affected by sediment, nutrients and other factors on which river ecosystems are based, it is equally important to understand the status of these factors as well as their behavior changes that may result from river channel alterations. It has been pointed out that most of the nutrients that stored in river channels are absorbed by fine sands and transported in times of flood, before being deposited at their subsequent locations. However, the behavior during floods of such very fine sands that have absorbed nutrients has yet to be sufficiently clarified, and its earliest possible clarification is required to help further promote future river projects. This report considers the flow down process of suspended solids, based on data obtained from flood observation of the Mukawa River and subsequent survey on riverbank deposits. And the behavior of suspended solids at the time of a flood was reproducible using the unsteady-flow and bed variation calculation model.

Key Words : Field observation, Suspended solid, Mukawa river, sediment transport, unsteady flow

1. はじめに

砂防ダムの建設や河川改修などの影響で流域に安定した土砂供給が行われなくなった。河道内での河床低下、海岸浸食などが社会問題として、大きく取り上げられている。また、ダムにおける堆砂問題の解決策として堆砂放流が試験的に実施されているが、下流域では放流後の微細砂の堆積によって生態系に重大な影響を与えていることが問題となっている。さらに、河川がダムの洪水調節によって安定した流況となり、河床形状が安定したことで、下流域における生態系が変化していることが指摘されている。これらの問題解決には、微細砂を含む土砂の流域一貫した移動現象の解明が必要不可欠なものとなっている。

一方、河川周辺における動植物の生息生育は河川生態系の基盤を形成する土砂や栄養塩類等と密接な関係があり、それらの制約を受けている。河道内での栄養塩類の輸送蓄積は、その大半が洪水時に浮遊物質に吸着された形で行われていることが指摘されている¹⁾。このようなことから、河川環境保全の立場からも土砂や栄養塩類等の現状や河道の変化に伴う挙動についての的確に把握することが試みられている。

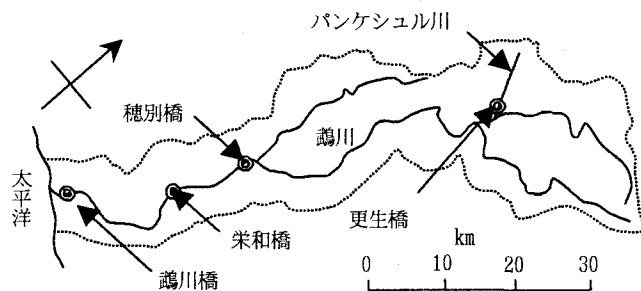


図-1 鵠川流域模式図

しかし、微細砂等で構成されるウォッシュロードと呼ばれる浮遊物質の洪水時の挙動については十分解明されておらず、上記の諸問題の解決に向けた早期解明が求められている。

本研究は、洪水時に水位のピークに先行して浮遊物質のピークが生起する現象に焦点を当て、図-1に示す鵠川流域における洪水時の流水中の浮遊物質濃度観測および洪水前後に実施された河岸堆積物調査を基に、1次元不定流河床変動計算も用いて、洪水時の浮遊物質の下流への輸送および浮遊物質と河岸堆積物との関係について検討を行ったものである。

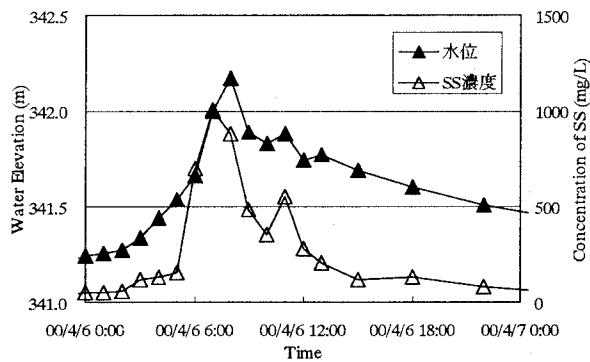


図-2 鷺川上流域（更生橋）における水位と浮遊物質濃度の時間変化

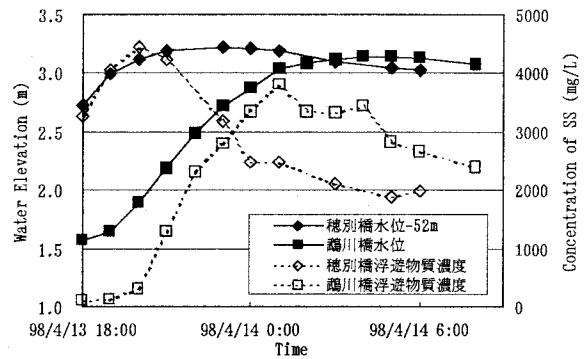


図-4 鷺川下流域（穂別橋・鷺川橋）における水位と浮遊物質濃度の時間変化

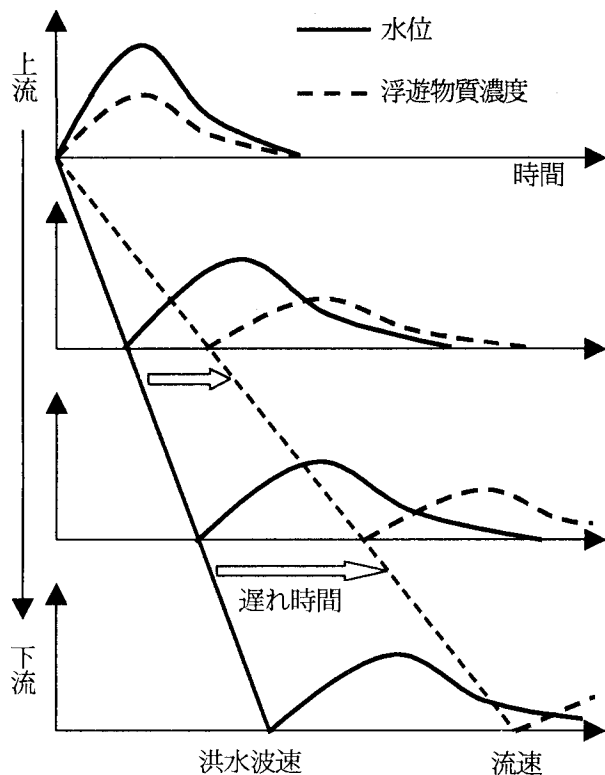


図-3 洪水波と浮遊物質の伝播模式図

2. 水位ピークと浮遊物質濃度ピークの生起時間

上流域（山地）では、生産源である斜面（流域）と河道とが隣接しており、浮遊物質の流送される距離が短いため、浮遊物質濃度のピークと流量のピークが同位相で推移することが知られている。図-2は、鷺川上流域に位置するパンケシュル川の更生橋において観測を行った結果である²⁾。浮遊物質濃度と水位変化が、ほぼ同位相で推移していることを示している。

上流から運搬された浮遊物質が下流に輸送される速度は、流速に概ね等しい。一方、水位変化である洪水波は、広長方形水路でのkinematic waveと仮定した場合、流速の5/3倍の速度で下流に伝播する。このことから考えると、

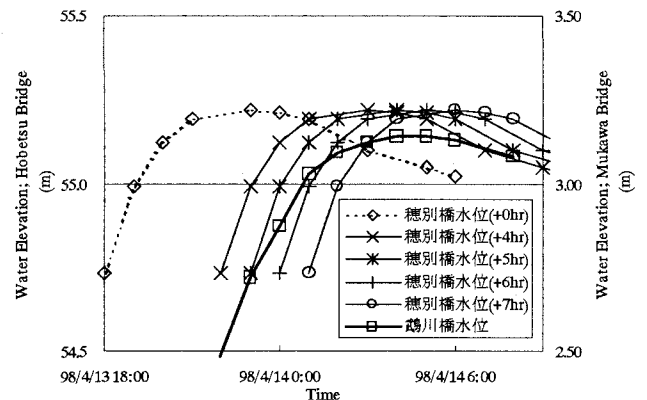


図-5 穂別橋と鷺川橋間の水位伝播時間

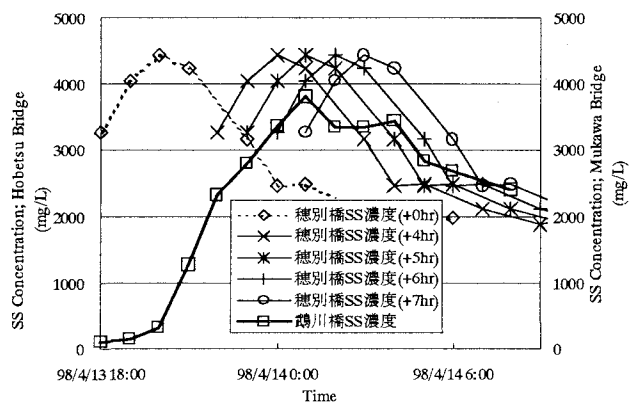


図-6 穂別橋と鷺川橋間の浮遊物質濃度伝播時間

図-3に模式的に表したように、上流域で河道に供給された浮遊物質は河川の下流域において洪水波に対して遅れた位相を持って伝播することになる。

しかし、浮遊物質の下流への伝播について洪水波に対して遅れた位相を持つ現象が観測されることは少なく、多くは水位のピークに先行して浮遊物質の濃度のピークが生じている³⁾。図-4は、2地点間で大きな支川が合流していない鷺川の鷺川橋および穂別橋において観測された浮遊物質濃度と水位の時間変化の関係を表したものである¹⁾。鷺川橋は河口から2.6km上流に、穂別橋は河口から40.7kmに位置している。この場合も水位のピークに先行して浮遊物質の濃度のピークが観測されている。また、

2地点間で水位および浮遊物質濃度がどの程度の時間で伝播したのかを表したものが、それぞれ図-5および図-6である。ピーク付近の時間変化を基に判断すると、水位、浮遊物質濃度ともに概ね5～6時間である。このことから鶴川の穂別橋・鶴川橋間では、水位と浮遊物質濃度は、同じ速度約2m/s程度で下流に伝播し、水位ピークに先立って浮遊物質濃度のピークが生じたこととなる。

この理由の一つとして、洪水時における掃流力の増加に伴い、河床から浮遊物質となる粒径の細かい砂粒が供給されることが考えられる。しかし、浮遊物質を主に構成する微細砂は、粒径0.1mm以下であり、通常河床に存在しない。ウォッシュロードの生産場が裸地斜面や溪岸堆積物など通常時は流水の洗礼を受けていない場所であるとともに生産されたウォッシュロードが流水中に取り込まれ、ほとんどそのまま流下するとした場合、下流域で観測された浮遊物質の濃度ピークが水位ピークに先行するという現象を説明するためには、浮遊物質の供給源がどこにあるかを明確にする必要がある。

3. 不定流計算による浮遊物質の挙動

穂別橋から鶴川橋までの間において、浮遊物質がどのような挙動をしているかを把握するため、1次元不定流計算にCIP法⁴⁾を用いて河床変動計算⁵⁾を行った。本研究では浮遊物質の挙動に着目しているが、河床材料との交換や他の粒径による遮へい効果等も取り込むため、混合粒径による河床変動計算を行った。なお、CIP法は差分を行う際の補完方法にスプライン補完を行う手法である。CIP法は、波形の伝播等で数値拡散が極めて小さく、洪水波を計算する場合に威力を発揮する。

(1) モデルの概要

開水路不定流の運動方程式および連続の式は、それぞれ(1)および(2)式で表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{A} \right) + \frac{\alpha}{2g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 = - \frac{\partial(h+\eta)}{\partial x} - \frac{n^2}{R^{4/3}} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (1)$$

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

ここで、 Q : 流量、 g : 重力加速度、 t : 時間、 h : 水深、 η : 河床高、 x : 縦断距離、 n : マニングの粗度係数、 R : 径深、 A : 断面積、 α : エネルギー補正係数である。

河床変動計算は、浮遊物質の挙動を見ることから掃流砂と浮遊砂について考慮することとした。(3)式で表される流砂の連続式により河床変動量を算出する。なお、計算は清水⁶⁾の研究を参考とした。検討対象である浮遊物質は、浮遊砂の中に含まれるものとして扱った。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{1}{b} \sum_i (q_{bi} b) + \sum_i (q_{sui} - w_f C_{bi}) \right\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 λ : 河床材料の空隙率、 q_b : 単位川幅当りの掃流砂量、 q_{su} : 単位時間単位面積当りの河床からの浮遊砂浮上量、 w_f : 浮遊砂の沈降速度、 C_b : 河床付近の浮遊砂濃度、 b : 川幅、添え字 i は粒径 d_i の値であることを示している。

掃流砂量式には、(4)式で表される芦田・道上の式⁷⁾を用いた。

$$\frac{q_{bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = 17 p_i \tau_i^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{ci}}{\tau_i} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*} \right) \quad (4)$$

ここで、 s : 砂の水中比重、 p_i : 粒径 d_i の粒子が河床面に占める割合、 τ_i : 有効無次元掃流力、 τ_{ci} : 無次元限界掃流力、 τ_c : 無次元掃流力、 u_{*c} : 限界摩擦速度、 u_* : 摩擦速度である。粒径別の限界摩擦速度は、(5)式で表されるEgiazaroff・浅田の式⁸⁾を使用した。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left\{ \frac{\log 23}{\log \left(21 \frac{d_i}{d_m} + 2 \right)} \right\}^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (5)$$

ここで、 u_{*cm} : 河床の平均粒径 d_m に対する限界摩擦速度であり、ここでは岩垣の式⁹⁾を用いた。

浮遊砂については、(6)式で表される粒径別の浮遊砂濃度の連続式および(7)式で表される板倉・岸の浮遊砂浮上量式¹⁰⁾を用いた。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \langle C_i \rangle h b + \frac{\partial (u h b \langle C_i \rangle)}{\partial x} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \langle C_i \rangle h b}{\partial x} \right) + q_{sui} b - w_f C_{bi} b \end{aligned} \quad (6)$$

$$q_{sui} = p_i K \left(\alpha \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{g d_i}{u_*} \Omega_i - w_f \right) \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon = 1/6 \kappa u_* h$ 、 κ : カルマン定数、 $\langle \rangle$: 水深平均値を表し、 $\langle C_i \rangle$ は(8)式で表す。また、 Ω_i は(9)式で表される。

$$\langle C_i \rangle = \frac{C_{bi}}{\beta} \{ 1 - \exp(-\beta) \} \quad (8)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{ci}}{B_{ci}} \frac{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{ci}}{B_{ci} \eta_i} - 1 \quad (9)$$

ここで、 ρ_s : 浮遊粒子の密度、 ρ : 流体の密度、 u_* : 粒径 d_i の粒子の有効摩擦速度、 $\beta = w_f h / \varepsilon$ 、 $\xi = z/h$ 、 $\eta_i = 0.5$ 、 $\alpha_i = 0.14$ 、 $a_i = B_{ci} / \tau_{ci} - 1 / \eta_i$ である。 B_{ci} は揚力算定の際の速度に摩擦速度を適用するための換算係数であり、均一粒径の場合0.143の値をとるが、混合砂の場合

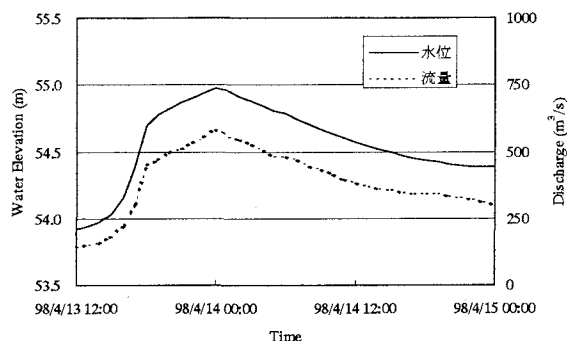


図- 7 計算上流端である穂別橋の水位と流量

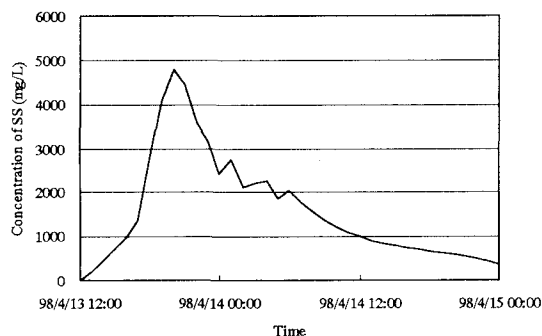


図- 8 計算上流端である穂別橋の浮遊物質濃度

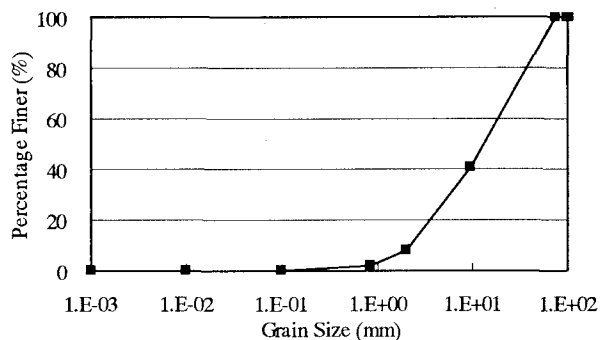


図- 9 計算に用いた河床材料の粒径分布

合に適用するため、遮へい効果を考慮し、沖・黒木¹¹⁾による(10)式によって与えた。

$$B_i = \frac{u_{*ci}^2}{u_{*ci0}^2} B_0 \quad (10)$$

ここで、 $B_0 = 0.143$ 、 u_{*ci0} ：均一粒径の場合の限界摩擦速度である。

さらに、粒径別の流砂の連続式は(11)式で表される。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{1}{b} \frac{\partial (q_{bi} b)}{\partial x} + q_{sui} - w_f C_{bi} \right\} = 0 \quad (11)$$

ここで、 δ ：交換層の厚さであり、 p_i は(12)式で表される。

$$p_i = \begin{cases} p_i & ; \partial \eta / \partial t > 0 \\ p_{i0} & ; \partial \eta / \partial t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 p_{i0} ：粒径 d_i の粒子が原河床に占める割合であ

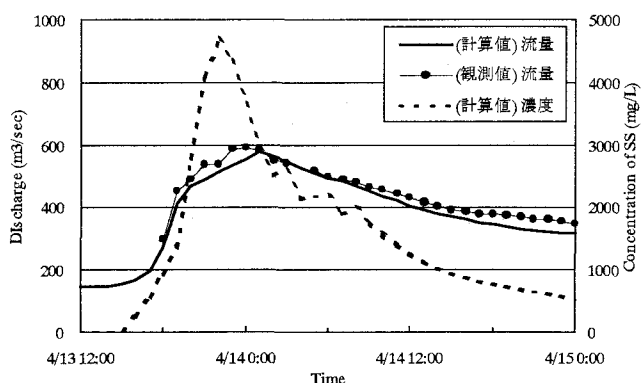


図- 10 栄和橋における再現結果

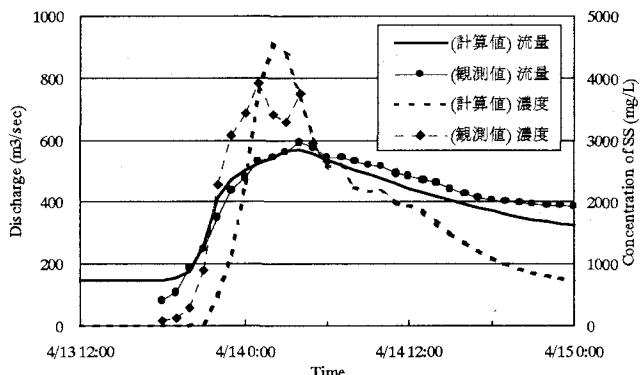


図- 11 穂別橋における再現結果

る。

(2)計算条件と計算結果

計算に使用した洪水は1998年4月13日に鶴川で発生した融雪出水である。ピーク流量は低水路満杯の600m³/sec程度であり、高水敷への乗り上げは観測されていない¹⁾。対象区間は観測値の存在する穂別橋から河口までとした。なお、計算に用いた河道断面は、200m毎に実施されている横断測量データを基に、対象洪水のピーク水位以下の河道として河床高と川幅を決定した。

不定流計算の境界条件として、上流端では穂別橋で観測された水位と流量を与え、下流端では水位が不明であり計算の安定性を考慮して水面勾配の縦断変化が直上流と同じになるよう設定した。また、穂別橋の水位が上昇し始めた時点の流量145m³/sを用いて不等流計算を実施し、初期条件とした。計算に用いた穂別橋の水位と流量を図-7に示した。

河床変動計算に用いた初期河床材料の粒径分布は、浮遊物質の挙動を把握することを主目的としていることから、計算区間の河床材料調査結果を基に平均的な分布を与え、計算区間において一定とした。なお、計算に用いた代表粒径は $d=0.05, 0.48, 1.43, 5.75, 42.3\text{mm}$ の5粒径である。また、鶴川橋、穂別橋の洪水観測において採水された浮遊物質の粒径は0.1mm以下であった。これは流水中の河床材料には存在しないが、河岸堆積物調査結果から河岸に存在することが確認されている¹²⁾。この

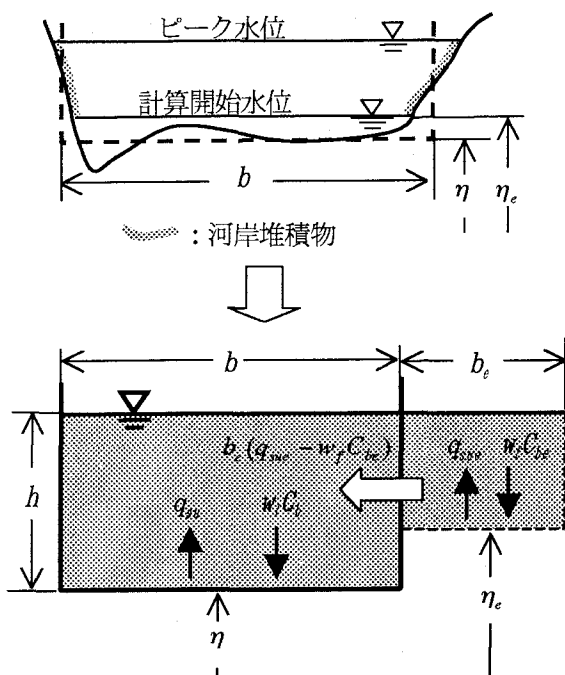


図-12 断面設定および河岸堆積物からの浮遊物質の供給モデル

ことから、代表粒径 0.05mm の粒子の挙動を浮遊物質の挙動として扱った。河床変動の境界条件は、上流端で動的平衡となるよう設定するとともに、代表粒径 0.05mm については図-8に示した穂別橋で観測された浮遊物質濃度を与えた。なお、穂別橋での浮遊物質観測は13日17時から実施されているため、それ以前の値は穂別橋における過去の観測結果^{1,12)}を整理した流量-浮遊物質濃度の関係から求めた。

河床変動計算に用いた初期河床材料の粒径分布を図-9に示した。

図-10および図-11は、それぞれ河口から 26.0km 上流に位置する栄和橋および鷗川橋における流量と浮遊物質の観測値と計算結果を比較したものである。流量については、両地点とも洪水減水期において計算値の方がやや低くなる傾向が認められるものの、洪水の立ち上がり時刻およびピーク流量は概ね再現している。一方、浮遊物質濃度は、鷗川橋におけるピーク濃度と波形の形状は再現しているものの、時間的にかなり遅れたものとなっており、浮遊物質の縦断方向の輸送に関して現象を十分に再現しているとは言いがたい結果となった。なお、栄和橋においては、浮遊物質の観測が行われていなかったため、比較はできていない。

(3) 河岸堆積物との交換を考慮したモデル

鷗川流域における洪水時の流水中の浮遊物質濃度観測結果から、洪水時の浮遊物質の横断方向拡散現象として、洪水立ち上がり初期に $0.01\sim 0.1\text{mm}$ の浮遊物質が河岸近傍から供給され流心に向かって移動し、その後流心から河岸に向かって移動していることが想定された¹²⁾。また、

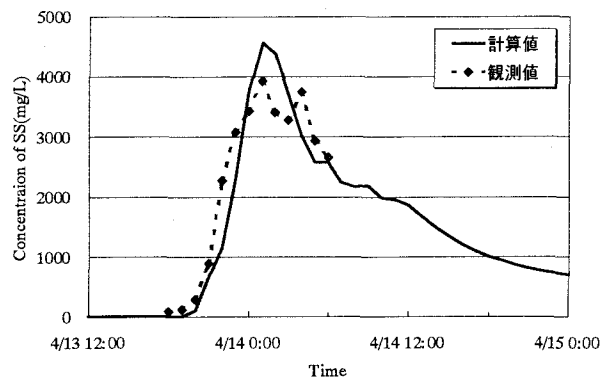


図-13 鷗川橋における再現結果

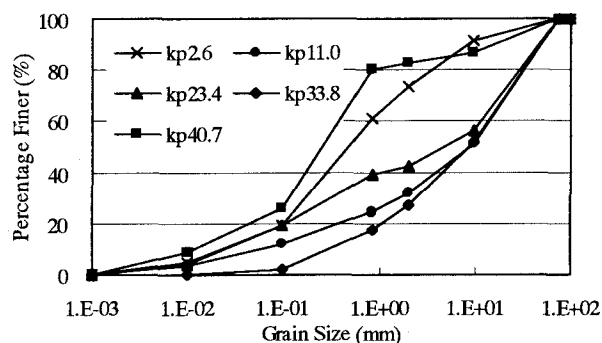


図-14 河岸堆積物の粒径分布

河岸堆積物の洪水中の洗掘・堆積現象を定量的に把握した結果、観測された浮遊物質の粒径と一致する 0.1mm 以下の河岸堆積物は、洗掘・堆積量の10%程度であったことから、浮遊物質と河岸堆積物との交換が洪水の中に行なわれていることが判明した¹²⁾。

以上の結果から、浮遊物質の輸送過程に関するモデルとして、1次元不定流モデルに微細砂の河岸堆積物との交換を組み込んだモデルを検討した。なお、1次元の計算であり実際の河川を対象とした検討であることから、流水中の浮遊砂と河岸堆積物との微細砂の出し入れについては、単純なモデルとし、直接的には河道内の浮遊砂濃度のみに影響を与えるものとした。また、河岸における微細砂の浮上沈降は、平常時に浮遊物質濃度が極めて低い値であることを考慮し、計算開始時の水位以上になった場合に影響が生じるよう仮定した。モデルの考え方は、以下の通りである。

計算開始水位を高水敷高 η_e とする仮想の高水敷を設け、この高水敷に流水が乗った際に、その場所でのせん断力により微細砂の巻き上げが生じるとともに、設定した河道断面での浮遊砂濃度と同一の濃度が仮想高水敷にも存在して砂粒子の浮上・沈降量が決定されることとした。仮想高水敷幅は、初期水位時の川幅と水位ピーク時の川幅の差を基に設定した。なお、この仮想高水敷は河岸近傍であり、洪水時において断面全体における分担流量が少ないことを考慮し、不定流計算においては流水の通過断面には含まれないこととした。図-12に仮想高水敷を含

断面設定における考え方の模式図を示した。

以上の考え方に基づき計算を行うため、(6)式で表される粒径別の浮遊砂濃度の連続式を、(13)式に変更した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\langle C_i \rangle h b \right) + \frac{\partial (u h b \langle C_i \rangle)}{\partial x} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial (\langle C_i \rangle h b)}{\partial x} \right) + b (q_{sui} - w_{fi} C_{bi}) + b_e (q_{suei} - w_{fe} C_{bei}) \quad (13)$$

ここで、 b_e ：仮想高水数幅、 q_{sue} ：単位時間単位面積当たりの仮想高水数からの浮遊砂浮上量、 C_{be} ：仮想高水数底面付近の浮遊砂濃度、添え字 i は粒径 d_i の値であることを示している。(13)式の右辺代3項が仮想高水数との浮遊砂の出入りを表現している。

仮想高水数を用いて河岸堆積物と浮遊物質との微細砂の交換を考慮した計算結果について、鶴川橋での観測値とあわせて図-13に示した。なお、仮想高水数に存在する河床材料の粒径分布は、対象区間で約10km毎に各断面3箇所で行った河岸堆積物調査結果¹²⁾の各地点での値を内挿する形で縦断的に分布が異なるように与えた。図-14に調査された各地点での河岸堆積物の粒径分布を示した。計算結果は、浮遊物質濃度の立ち上がり時刻を概ね再現することに成功しているが、濃度のピーク値が観測値に比べ若干大きな値となってしまう。このことは、観測で河岸部と流心部で浮遊物質の濃度差が生じていること、すなわち水位上昇期には仮想高水数の濃度が河道部に比べて高くなり砂粒子の浮上を抑制する現象を、このモデルでは取り込んでおらず、簡単のため仮想高水数と河道との浮遊砂濃度を等しいと仮定したこと起因しているものと考えられる。今後は、横断方向の濃度差に起因する拡散現象をどのようにモデルに取り込んでいくかが課題となる。

仮想高水数モデルにより、浮遊物質濃度の立ち上がり時刻を概ね再現できたことは、洪水時の浮遊物質の縦断方向輸送を考える場合、河岸堆積物との交換を考える必要があることを示すものと考えられる。

4. おわりに

鶴川における洪水観測の結果に基づいた浮遊物質の縦断的な輸送過程を検証することを目的として、1次元不定流河床変動計算を行った。その結果、ウォッシュロードとみなされる浮遊物質が河床と交換せずに流下するとした場合、濃度の立ち上がりが観測値に比べ遅くなる結

果となった。浮遊物質が河岸堆積物と交換しながら流下することを表現する簡単なモデルを組み込むことにより、流量、浮遊物質濃度ともに、観測値と計算値が一致する、すなわち浮遊物質濃度のピークが流量のピークの前に生起するという現象を再現することができた。

仮想高水数高および仮想高水数幅の設定には、ピーク濃度を概ね一致させるという不確定な部分も存在するが、この結果は既往の調査結果を裏付けるものであり、洪水時の浮遊物質濃度の変化が河岸堆積物の影響を受けていることを示唆するものであると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三宅洋、渡邊康玄：洪水流への浮遊物質の供給過程、土木学会北海道支部論文報告集第56号(B)、pp.132-138, 2000.
- 3) 倉茂好匡：河川の浮流土砂研究における最近の動向、北海道大学地球物理学研究報告No.59、pp.1-13, 1996.
- 4) 矢部孝、観山正見、梶島成治：パソコンによるシミュレーション物理、朝倉書店、pp.41-47, 1992.
- 5) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法、開発土木研究所報告第93号、1991.
- 6) 清水康行：沖積河川の縦断形と河床材料分布形の形成について、土木学会論文集No.521、pp.69-78, 1995.
- 7) 芦田和男、道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究、京都大学防災研究所年報第14号B、1971.
- 8) 浅田宏：山地河川の流砂量と貯水池の堆積過程に関する研究、電力中央研究所報告総合報告No.2、1976.
- 9) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学研究、土木学会論文集第41号、1956.
- 10) Itakura, T. and T. Kishi : Open Channel Flow with Suspended Sediments, Jour. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 106, No. HY8, 1980.
- 11) 沖健、黒木幹男：混合床上の浮遊砂量の算定式の検討、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集、pp.415-416, 1985.
- 12) 渡邊康玄、長谷川和義、橋本謙秀：洪水時における浮遊物質の横断面内輸送と河岸堆積微細砂の堆積状況、土木学会水工学論文集第44巻、pp.413-418, 2000.

(2000.10.2受付)