

2003年台風10号による北海道日高地方河川の 洪水流出及び土砂動態特性について

RUNOFF AND SEDIMENT TRANSPORT CHARACTERISTICS ON THE RIVER
SYSTEM OF HIDAKA REGION, HOKKAIDO, BY TYPHOON NO.10, 2003

ウォンサ サニット¹・清水康行²・村上泰啓³
Sanit WONGSA, Yasuyuki SHIMIZU and Yasuhiro MURAKAMI

¹学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-0808 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (同上)

³正会員 主任研究員 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

Risk assessment and water resources management are required to get a reliable estimation not only the sub-catchment scale, but also the catchment scale with a few and/or no rain gauge station. A simple 1-D model considering slope runoff and channel flow with soil eroded, sediment transport, floodplain sedimentation and riverbank erosion is presented to assist in predicting the consequences of extreme flood event. Typhoon no.10 were used to validate the proposed numerical model. It was found that the values ϵ for calculated period were greater than 0.88, indicating well fit between measured data and this proposed model. In addition, the proposed model was exploited to simulate sediment transport problems. The results indicate that calculated sediment yields compared well with measured data. However, a more precisely sediment transport study is needed.

Key Words : dam, alluvial system, sediment transport, bank erosion

1. はじめに

近年、河川流域の様々な地形、地質、植生、水理構造物などの特性を考慮した降雨・流出およびこれに伴う土砂輸送を一括的に再現・予測するモデルが求められている。このような流域内の面的な広がりを持つモデルを開発することは、流域の管理という観点から言って非常に重要である。

本論文では、流域を土砂生産域としての山地流域と土砂輸送域としての河道とに分け、この両方で水と土砂の輸送を追跡可能なモデルの開発を行った。山地流域においては降雨による斜面の水流をkinematic wave法で追跡し、侵食量を土砂生産量として与え、土砂生産はこの水流によって運搬されるとする降雨・土砂生産流出モデルとした。一方、河道においては斜面から流入する水流および土砂量を入力としてダムを含む河道網内の流れおよび側岸侵食を含めた土砂輸送、さらには河床変動を一括計算する河道網モデルを提案する。

さらに本研究では降雨からの土砂生産量の予測の可能

性を探る目的で、台風10号による北海道道南地方の胆振、日高水系の沙流川と厚別川への適用を行った。なお、河道の流れの計算は、計算範囲が平地から山地までの幅広い領域で、流れの状態も常流・射流が混在する流れとなるため、このような条件でも再現性の良い高精度スキームを用いて計算の精度向上を図った。結果は、研究対象流域の洪水流量・土砂量ともにある程度再現することが可能となった。

2. 台風10号による被害状況

(1) 降雨流出状況

平成15年8月、寒冷前線の北上に伴い北海道の太平洋沿岸では8日の6時頃からところどころで降雨が始まり、9日3時から9時頃にかけて、平取観測所で10mm/hr前後の降雨があったがその後やや弱まり、再び13時頃から20～40mm/hrの激しい雨が数時間降り続いた。特に22時から23時までの1時間に42mmという集中的な降雨があり、総降雨量は約263mmに達した(図-1)。

道南の胆振，日高地方に位置する沙流川は流域面積約1,350km²，流路延長約104kmの一級河川であり，また，厚別川は流域面積約284km²，流路延長約41kmの二級河川である(図-2)．今回の出水時にはほぼ全流域を20～40mm/hrの豪雨が襲い，流量および水位が急上昇し，沙流川水系の平取観測所においてはピーク水位が28.3m(危険水位25.9m，計画高水位27.55m)まで上がった．このため，増水した沙流川の流量が大量に二風谷ダムに流入したが，ダムの洪水調節によりピーク流量を約900m³/s(洪水貯水量約25,800,000m³)カットすることができた．図-3は今回の出水期間中の二風谷ダムの貯水池の流入量，放流量および貯水位のハイドログラフである．ただし， Q_m は流入量， Q_{out} は放流量である．一方，厚別川では洪水流は至る所で堤防を越流し，下流の平取町，新冠町，共栄地区では大きな浸水被害を受けた．同程度の降雨であったにもかかわらずダムのあった沙流川では下流の氾濫がほとんど無かったのに対して，厚別川では大規模な氾濫があり，ダムの有無による違いが顕著であった．また，今回の記録的な降雨により，多数の山腹斜面の表層崩壊が発生し，これに伴い大量の流木も発生し，二風谷ダムでは約67,000m³の流木を捕捉した¹⁾(写真-1)．

(2) 被害状況

北海道庁の発表によれば²⁾台風10号による被害状況は，死者10名，行方不明1名，負傷者3名，家屋の全壊18棟，半壊・一部損壊33棟，床上浸水129棟，床下浸水438棟，避難者は7,304人であった．沙流川では本川が危険水位に達したため住民の避難が行われたが，支川氾濫による内水被害にとどまった．しかしながら，厚別川では外水氾濫により，この地域の過去の浸水災害を遥かにしのぐ規模で，家屋，農地，牧草地などが濁水に浸かり，多大な被害を受けた(写真-2)．

(3) 流量およびSSの観測結果

沙流川では，二風谷ダムのピーク流入流量が約6,353m³/sに達し，ダムが完成(1996年4月)以降最大の出水となった．この出水期間中，ダム貯水池を含む上下流で流量およびSSの連続観測が開発土木研究所によって行われた³⁾．図-4に観測された流量とSSの関係に基づくSS流砂量と流量の関係を示す($Q_{SS}=Q \cdot S / (w_s \times 10^6)$)⁴⁾．

$$Q_{SS} = 2.0 \times 10^{-6} Q^{2.05} \quad (1)$$

ここで， Q は流量， Q_{SS} はSS流砂量， S は濁度， w_s は砂粒子の単位体積重量($w_s=2.65\text{g/cm}^3$)であり，相関式の作成にはダム貯水池上流のデータのみを用いてある．SSの観測は全て表面採水でありほとんどがwash loadと考えられる．(1)式とダム流入量および放流量のハイドログラフを用いて，台風10号によるダム貯水池に流入したwash loadの収支を計算すると約426,668m³となる．

また，図-5は厚別川の豊田観測所における水位および

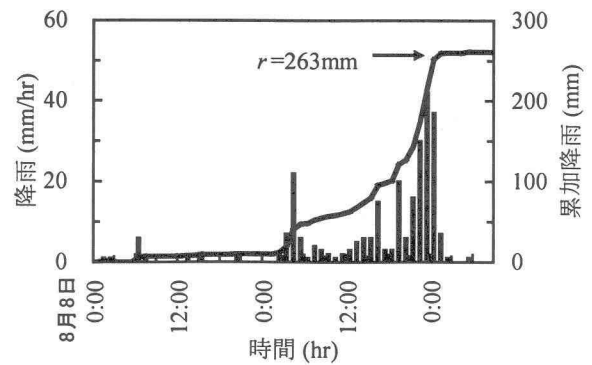


図-1 台風10号の降雨特性(平取観測所)．

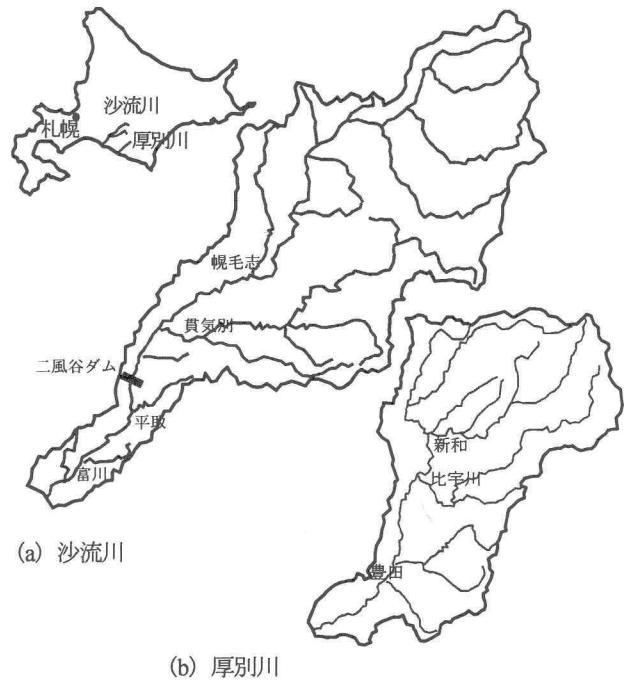


図-2 研究対象流域．

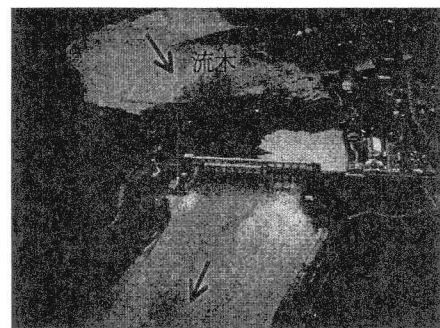


写真-1 二風谷ダムの流木状況．



写真-2 厚別川下流の洪水氾濫状況．

流量を示す。ただし、ここでの流量は豊田観測所の洪水前の H - Q 式を用いたものであり、さらに、出水時の水位が橋梁の桁により堰上げされていたなどの悪条件もあり、厚別川の流量は不確定なものである。

3. ダムを含む洪水流出、土砂動態の数値計算

(1) 基礎式

本研究で用いられる基礎式は、Wongsa and Shimizu⁵⁾によって提案された1次元斜面・河道網の河床変動モデルを用いる。中間流を考慮した斜面上での流れに対する連続式、運動方程式はそれぞれ(2)式、(3)式を用いる。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial X} = r_e \quad (2)$$

$$q_s = \begin{cases} kS_0 h_s / \gamma & ; 0 < h_s < \gamma D \\ \alpha(h_s - \gamma D)^m + kS_0 h_s / \gamma & ; h_s \geq \gamma D \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 h は水深、 q は単位幅流量、 r_e は有効降雨強度、 k は浸透率、 γ は空隙率、 D は中間層厚さ、 $\alpha = S_{0s}^{0.5}/n_s$ 、 S_0 は斜面勾配、 n は粗度係数、 $m=5/3$ 、 t は時間、 X は斜面流れの流下方向座標、下付き添え字 s は斜面である。

本研究では便宜的に降雨期間中の山腹斜面の標高変化を無視し、粒径別の土砂濃度、斜面上の各粒径の構成比率はそれぞれ(4)式、(5)式で計算される。

$$\frac{\partial(c_{si} h_s)}{\partial t} + \frac{1}{W_s} \frac{\partial(c_{si} Q_s)}{\partial X} = D_{ri} + D_{fi} - D_{di} \quad (4)$$

$$\delta \frac{\partial p_{si}}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{W_s} \frac{\partial(q_{Bsi} W_s)}{\partial X} + D_{ri} + D_{fi} - D_{di} \right] = 0 \quad (5)$$

ここで、 c は土砂濃度、 D_r は降雨による土砂生産離脱率、 D_f は表面流による土砂生産離脱率、 D_d は土砂生産沈降率、 W は斜面幅、 p は土砂粒子の構成比率、 δ は交換層厚、 λ は空隙率($\lambda=0.4$)、下付き添え字 i は混合粒径における粒径 d_i の粒子に対する物理量であることを示す。また、降雨による生産土砂離脱率、表面流による土砂生産離脱率および沈降率はそれぞれ次式で表される。

$$D_{ri} = \frac{k_r F_w}{\rho_s} (1 - C_g) [(1 - C_c) M_r + M_d] \quad (6)$$

$$D_{fi} = \begin{cases} \frac{k_f}{\rho_s} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*i}} \right) ; \tau_{*i} > \tau_{*ci} \\ 0 & ; \tau_{*i} < \tau_{*ci} \end{cases} \quad (7)$$

$$D_{di} = k_d w_{fi} c_i \quad (8)$$

ここで、 k_r は降雨による生産土砂離脱係数、 F_w は水深補正係数、 C_g は樹木地被覆率、 C_c は樹冠地被覆率、 M_r は降雨による単位面積当たり運動量、 M_d は樹冠落葉降雨によ

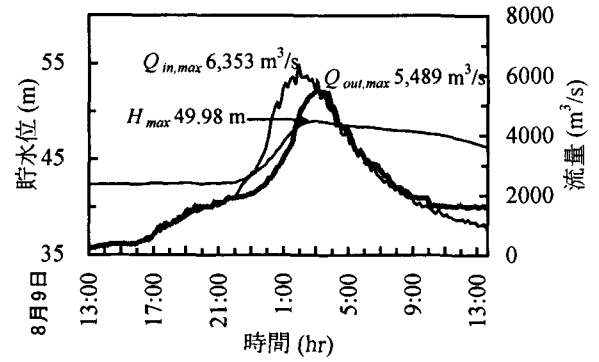


図-3 二風谷ダムにおける流入量、放流量、貯水位のハイドログラフ。

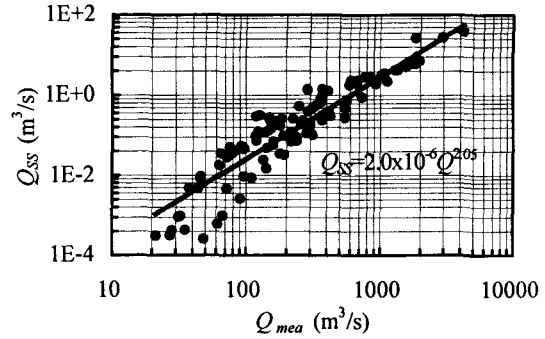


図-4 流量とSSによる流砂量の関係(ダム上流)。

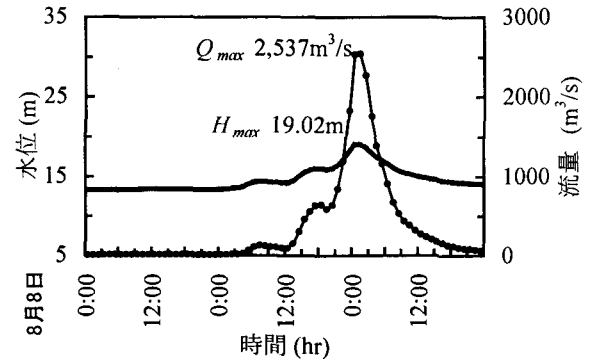


図-5 豊田観測所における水位、流量のハイドログラフ。

る単位面積当たり運動量、 k_f は表面流による生産土砂離脱係数、 τ_{*i} は無次元掃流力、 τ_{*ci} は無次元限界掃流力、 u_{*i} は摩擦速度、 u_{*ci} は限界摩擦速度、 k_d は生産土砂沈降係数、 w_{fi} は生産土砂沈降速度である。

河道内の流れに対する連続式および運動方程式はそれぞれ(9)式、(10)式を用いる。

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x} = q_L \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial(Q_c^2/A_c)}{\partial x} + gA_c \left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f \right) = \frac{q_L Q_c}{gA_c^2} \quad (10)$$

ここで、 A は河道の流水断面積、 Q は流量、 q_L は単位流路長当たりの横流入・出量、 H は水位($H = \eta_c + h_c$)、 η は河床高、 h は水深、 S_f は摩擦勾配、 g は重力加速度、 x は流下方向座標、下付き添え字 c は河道である。本研究では、摩擦勾配はManning-Strickler則を適用する。

本モデルでは粒径別浮遊砂濃度の水深方向分布式は指数分布を採用し、粒径別浮遊砂濃度および全流砂の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(<c_{ci}>h_c) + \frac{1}{B_c} \frac{\partial(Q_c <c_{ci}>)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi}c_{bi} + \frac{q_L c_{BLi}}{B_c} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta_c}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B_c} \frac{\partial \sum_i (q_{Bci} B_c)}{\partial x} + \sum_i (q_{sui} - w_{fi}c_{bi}) + \frac{\sum_i (q_L c_{BLi})}{B_c} \right] = 0 \quad (12)$$

ここで、 $<c>$ は水深平均濃度、 B は川幅、 q_B は掃流砂量(芦田・道上の式)、 q_{sui} は浮上量(板倉・岸の式)、 w_f は沈降速度(Rubeyの式)、 c_b は基準濃度、 c_{BLi} は横流入・出浮遊砂の基準濃度、 Σ は粒径別の量を合計したものである。

河道から氾濫原に流入・出する氾濫流量は横越流を仮定し本間の公式による横越流式を用い、河道部から氾濫原へ流入する氾濫流量は破堤口における横越流量を河床勾配で補正する。また氾濫原では、浮遊砂の再浮上は考慮せず、沈降量のみを考慮した次式を用いる。

$$\frac{\partial \eta_f}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} \sum_i w_{fi,f} c_{bi,f} = 0 \quad (13)$$

ここで、下付き添え字 f は氾濫原である。

側岸侵食によって、河道へ供給される土砂量は側岸上の潤辺方向総流砂分布を考慮した次式を用いる⁶⁾。

$$q_{Bp} = q_B \tan \phi \quad (14)$$

$$\tan \phi = \frac{-\Xi}{\sqrt{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (15)$$

ここで、 q_{Bp} は側岸侵食量、 $\Xi = (2A_3/(C_D A_2))^{0.5}$ 、 A_2 、 A_3 は砂粒子の2、3次元形状係数、 C_D は抵抗係数、 z_b は横断方向の河床高、 y は横断方向の座標である。本研究では、側岸での平均せん断力を河道中央部の底面せん断力から評価して、適当な掃流砂量式から側岸侵食量が算出される($\tau_{Bp} = 0.67 \sim 0.76 \tau_0$)⁷⁾。また、山地河道のarmor coatの形成・破壊を考慮し、次式を用いる⁸⁾。

$$q_{Bp} = \begin{cases} 0 & ; h_c \leq h_d \\ (h_c - h_d)/h_c \cdot \bar{q}_{Bp} & ; h_c > h_d \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 h_d はarmor coat破壊水深である。本研究では、 $h_d = d_{90}$ を用いる。

(2) 計算方法

国土地理院発行の250mメッシュ数値標高データから対象河川流域の模擬の斜面、河道網を作成する(表-1)。計算手法について、河道部の水流は常・射流が混在する流れでも再現性の良いCIP法を用い、土砂量は風上差分法

により計算する。また、斜面部は斜面流出、土砂生産流出、氾濫原流入・出量と土砂堆積モデルを風上差分法で計算する。モデルに入力するデータは時間降雨だけであり、各斜面に最も近い観測所の降雨を与える。境界条件では、上流端は流量、下流端は水位を与える。流砂量の境界条件は掃流砂、浮遊砂ともに動的平衡状態を仮定し、下流は自由流出とする。初期条件では、斜面部・氾濫原はゼロ水深を仮定し、計算開始1時間後までの流れと河床変動の計算を行うこととする。土砂の計算は混合粒径で行ない d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} より河床材料の粒度分布に対する対数正規分布を仮定する。

(3) ダム地点における境界条件

計算中にダムなどの水理構造物が存在する場合、流れが不連続となるため、ダムの特性を考慮した境界条件の設定が必要となる。ここでは、流れの計算ではダムサイト地点においては実際の貯水位を与え、下流に対してはダムの放流流量を与えることとした。流砂量の計算では二風谷ダムのオリフィスゲートが河床付近に設置されていることを考慮し、掃流砂・浮遊砂ともにダムサイト地点で計算された土砂量がそのままオリフィスを通して下流へ流下させることとした。これよりダムなどの水理構造物を含む流れと河床変動計算を一括して扱うことが可能となる。

(4) 計算条件

計算条件は、河道部での $\Delta x = 500 \sim 1,000\text{m}$ 、斜面部での $\Delta X = 100 \sim 200\text{m}$ 、 $n_s = 0.85$ 、 $k = 0.025$ 、 $\gamma = 0.2$ 、 $D = 0.5\text{m}$ 、計算時間ステップ $\Delta t = 1.0\text{s}$ を用いる。斜面の土砂生産モデルについて、 $k_r = 20.0$ 、 $k_f = 0.0005$ 、 $C_g = 0.8$ 、 $C_c = 0.8$ である。土砂粒径を最小0.01mmから最大400mmまでを15粒径に分割する。有効降雨について、一洪水期間の流出係数は一定とし、本研究では、沙流川および厚別川はそれぞれ $f = 0.75$ および 0.95 とした。

4. 計算結果

(1) 洪水ハイドログラフの再現

本モデルはダムを含む降雨から斜面流出、河道追跡を計算する流出モデルである。この計算法の妥当性を検証するために、図-6に前章の出水期間中に沙流川水系の主な観測所における洪水流量の計算値と観測値の比較を示す。黒い丸は観測流量、実線は計算流量である。図より計算値と観測値から得られた洪水ハイドログラフはほぼ対応することが分かる。また、モデルの洪水ハイドログラフの再現性を検討するための評価関数としてNash効率を用いた⁹⁾。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{cal,i} - Q_{mea,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mea,i} - \bar{Q}_{mea})^2} \quad (17)$$

ここで、 ϵ はNash効率、下付き添え字 cal 、 $meal$ はそれぞれ計算値、観測値である。

上式より求めた主な観測所におけるNash効率は約0.88-0.91程度であり、良い精度で再現できたことが分かる(表-2)。なお、出水期間中に H - Q 関係式の適用上限を超えた河口付近の富川観測所(Kp3)のピーク流量は約5,766 m^3/s と推定できた(図-6(d))。

また、厚別川水系における洪水ハイドログラフの検討について、前章にも記述したように今回の出水時におけるピーク水位が豊田観測所の H - Q 関係式の適用上限を超えたため、洪水流量の観測値そのものの精度に問題がある。そこで、本研究では隣接する沙流川水系の諸モデル係数を用い、厚別川の洪水ハイドログラフの推定を行うこととした。図-7は上記の沙流川水系で用いられた諸定数を用いて厚別川の過去の出水である1998年8月の出水時の計算を行い、豊田観測所の計算値と観測値の比較を示したものである。ピーク流量および洪水ハイドログラフの増・減水期と共に良い精度で再現でき、厚別川水系でも沙流川水系と同じ諸定数を用いることの妥当性が確かめられた。なおこの場合のNash効率は約0.96程度である。以上の結果から、本モデルにより厚別川の今回の洪水ハイドログラフを推定することが可能である。図-8は台風10号の出水時の厚別川各地点における洪水ハイドログラフの計算結果である。ピーク洪水流量は、新和地点で約1,589 m^3/s 、比宇川合流点で約726 m^3/s 、豊田観測所は約2,683 m^3/s 、河口は約2,884 m^3/s と推定できた。なお、豊田観測所でのピーク流量の計算値は観測値より約146 m^3/s 多い値となっている。

(2) 土砂量の推定

図-9は沙流川の二風谷ダム貯水池(ダムサイトから上流5.2km地点まで)における平均河床高を調査年別に縦断的に示したものである。台風10号の出水時によるダム湖内の堆積厚さは約0.3~1.5m程度であり、出水前の2003年6月と出水後の8月の測量結果の比較から今回の出水によるダム堆砂量は約1,100,000 m^3 となる。これは前章で述べたSSの貯水池における収支量約426,668 m^3 より多い量となっており、単純な流量・SSの相関関係から求めた土砂収支では計算が合わない。従って、本モデルで行っているような掃流砂・浮遊砂も含めた全流砂量の検討が必須である。今回の計算では掃流砂・浮遊砂の計算も行っており、二風谷ダム貯水池上下流での浮遊砂量の収支は約99,500 m^3 、掃流砂量の収支は約39,720 m^3 と計算されており、SSの観測結果による流砂の収支がwash loadの収支だとすると、wash loadを加えた総量は565,888 m^3 となり貯水池内の堆積物の空隙率が0.4とすると、計算から求めたダム堆砂量は約943,147 m^3 となり実測にほぼ一致することになる(表-3)。図-10は二風谷ダム貯水池内(Kp0.4)の低質粒径分布の計算値と観測値の比較を示したものである。結果は、計算値が観測値より大きいと

表-1 モデルの河道数と斜面数。

流域名	河道	斜面
沙流川	17	34
厚別川	13	26

表-2 各観測所のNash効率。

流域名	地点名	Nash効率
沙流川	幌毛志	0.89
	貫気別	0.88
	二風谷ダム	0.91
厚別川	豊田	0.96

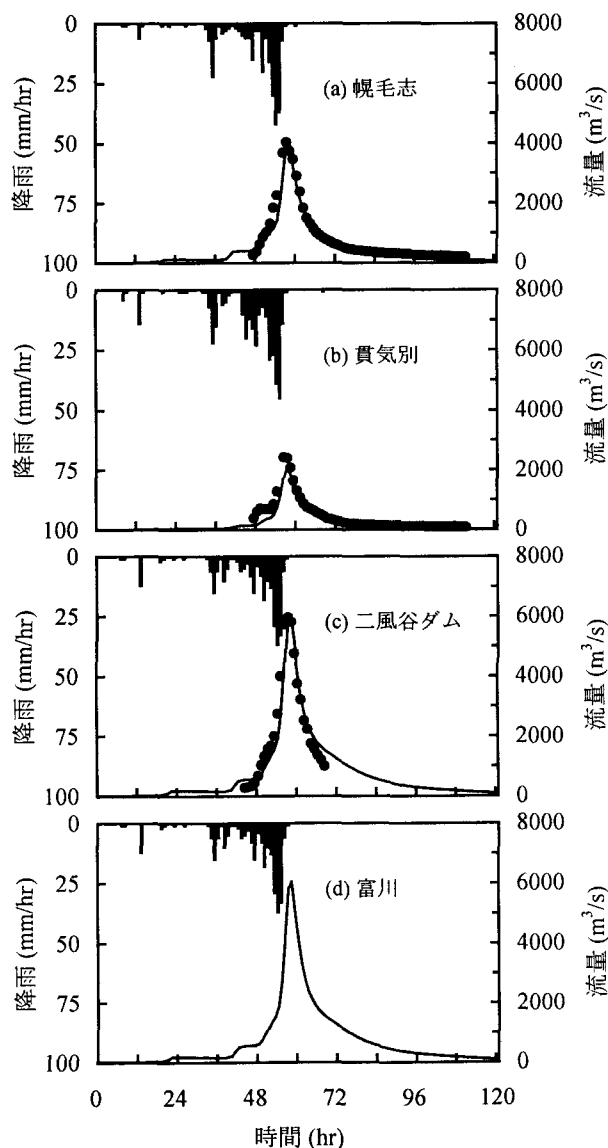


図-6 計算値と観測値の比較(沙流川、2003年8月7日17時より)。

なっており、ダム湖内に堆積した土砂の殆どは微細粒子である(計算の最小粒径は0.01mm)。これらの微細粒子はwash loadから沈殿したものと推測される。

また厚別川においても同様の計算が行われており、流砂の計算結果は河口からの流出量で浮遊砂量は約

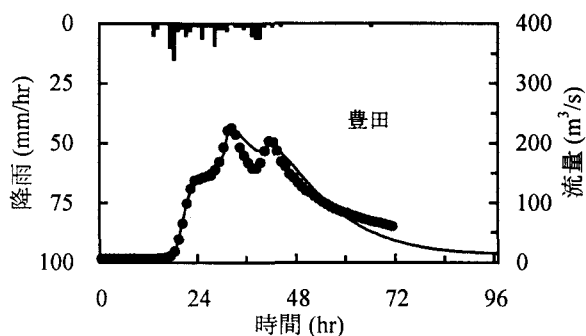


図-7 計算値と観測値の比較(厚別川;1998年8月7日17時より).

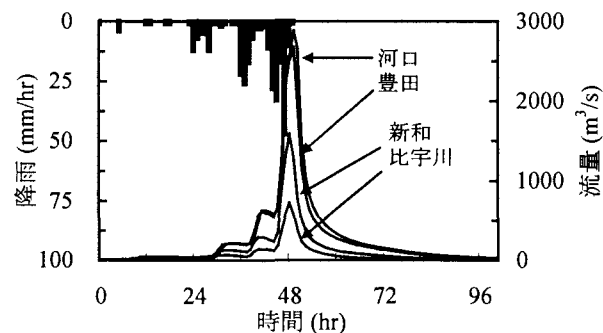


図-8 洪水ハイドログラフの推定値(厚別川;2003年8月7日17時より).

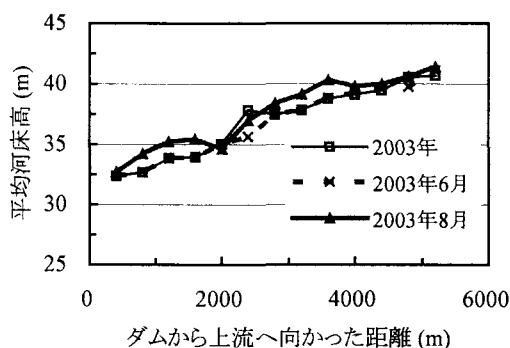


図-9 二風谷ダム貯水池平均縦断面図.

表-3 二風谷ダムにおける土砂収支.

土砂量	流入 (①)	流出 (②)	差 (①-②)
Q_B (m ³)	40,000	280	39,720
Q_S (m ³)	138,000	38,500	99,500
Q_{WL} (m ³)	2,217,692	1,791,024	426,668
		合計	565,888

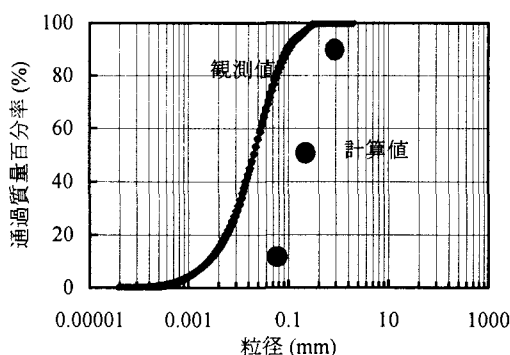


図-10 二風谷ダム貯水池内の低質粒径分布(Kp0.4).

7,500m³, 掃流砂量は約3,800m³となった. なお, これらの計算結果は用いている河床材料や河道断面などのデータが現時点で入手可能なもの, もしくは推定値であり, 計算結果も速報的なものである. 今後, 詳細な再検討が必用である.

5. おわりに

本研究では, 斜面, 河道網の河床変動モデルによる流域全体を一括して計算する数値モデルの開発を行った. 沙流川と厚別川を対象にして, 台風10号の豪雨の出水時による洪水ハイドログラフ, 土砂量の時間的変化の数値シミュレーションを行ない, 計算値と観測値を比較した. この結果, 計算値の洪水ハイドログラフと土砂量は観測値とオーダー的にはほぼ一致した.

今後, 現地観測データを用いてモデルパラメータの同定, 検証が必要である. また, 本研究が提案しているモデルを用い, 浮遊砂・掃流砂・wash loadを考慮した詳細な解析が必要である.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 第一筆者に奨学金を支給していただいた(財)日立国際奨学財団, 観測データを提供していただいた北海道開発局の関係者に感謝いたします.

参考文献

- 1) 室蘭開発建設部, <http://www.mr.hkd.mlit.go.jp/index.html/>.
- 2) 北海道台風10号被害速報, <http://www.pref.hokkaido.jp/menu.html/>.
- 3) 開発土木研究所資料, 水工学論文集, Vol.48, 2003. (投稿予定)
- 4) 坊野聡子・清水康行・黒木幹男・藤田睦博・吉田義一: ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.61-72, 2000.
- 5) Wongs, S. and Shimizu, Y.: Modelling pre-channelization and their impact on flood and sediment yield in Ishikari River basin, *Ann. J. of Hydraulic Eng.*, Vol.47, pp.223-228, 2003.
- 6) 村上正吾・林誠二・亀山哲・渡辺正孝: 河川流域内農林地域における土砂動態モデルに関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.45, pp.799-804, 2001.
- 7) Ikeda, S.: Self-formed straight channels in sandy beds, *Proc. of ASCE*, Vol.107(HY4), pp.389-406, 1981.
- 8) 金屋敷忠儀・芦田和男・江頭進治: 山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究, 第24回水理講演会論文集, pp.143-151, 1980.
- 9) Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models. Part1. A discussion of principles, *J. of Hydrol.*, Vol.10, pp.282-290, 1970.

(2003. 9. 30受付)