

荒川上流域および河道平面形の変化が 河床変動に与える影響

IMPACTS OF ALTERATION IN THE UPSTREAM WATERSHED AND THE STRAIGHTENING OF
RIVER CHANNEL IN THE ARAKAWA RIVER ON THE DOWNSTREAM BED DEFORMATION

八木澤順治¹・田中規夫²・竹内博輝³・玉井信行⁴

Junji YAGISAWA, Norio TANAKA, Hiroki TAKEUCHI and Nobuyuki TAMAI

¹学生会員 修(工) 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院助教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³非会員 株式会社 アイ・エヌ・エー 総合技術部 (〒112-8668 東京都文京区関口 1-44-10)

⁴正会員 工博 金沢大学工学部教授 土木建設工学科 (〒920-1192 石川県金沢市小立野 2-40-20)

Distributed models for water balance, sediment production and transportation were applied to the Arakawa River basin. The influences of historical alternation in the upstream watershed and river stream on downstream bed degradation were analyzed. Two impacts, construction of dams and the straightening of meandering stream were selected. The model for river discharge was validated at three dams and at one river discharge observation point. The sediment production was also confirmed with the accumulated amount of sediment in three dams. The sediment dynamic analysis showed that the straightening of meandering stream affects ten to hundreds times more on the bed degradation than the construction of dams does at the downstream of the alluvial fan. The effects of dams were restricted upstream of the alluvial fan, because it decelerate the flow at inlet and store the flood in the segment. The alluvial fan also controls the flow to the downstream. Therefore, the historical straightening of meandering stream located in the downstream of the alluvial fan determines the bed degradation in the downstream section.

Key Words : water and sediment valance model, construction of dam, straightening of meandering stream, Arakawa River

1. はじめに

近年における貯水ダム、砂防ダムの設置は河川への流入土砂量を大きく減少させ^{1), 2)}、河道蛇行部の直線化は河道における洪水の滞留時間・土砂貯留容量を大きく変化させている。これら河川上流域や河道における改変は土砂に関わる多くの問題を引き起こしている。高水敷や砂州への洪水攪乱頻度が減少することにより、河道内に繁茂した植生は草本から木本へと変化し、それは河川の生態系と洪水流出に影響を与える。また、ダム貯水池の設置による海岸域への土砂供給量の急激なる減少は、海岸侵食を引き起こす原因となっている。

土砂量の解析に関して、土砂生産を表現するための多くの集中型モデルが開発されてきた。分布型モデルもまたPCの性能の向上によって1990年代から多くのモデルが開発されている。しかし、それらのモデルの多くはキネマティックモデルで陸上を追跡しており土砂輸送は連

続式に含まれていない。これらのモデルは物理量を保存した分布型モデルではなく、グリッドスケールに適用された集中型モデルを組み合わせでモデルが作られている。Johnson et al.³⁾は陸上の物理的な土砂侵食モデル(CACS2D-SED)を開発し、Julien and Pojas⁴⁾は土砂生産のいくつかの実験式を含んだdiffusive waveモデルによってモデルの改良を行った。Luo⁵⁾は大流域に対して分布型水収支モデルを開発し(LUO-TAMAI model)、関東地方にそのモデルを適用させている。Luoら⁶⁾はさらに土砂生産、土砂輸送モデルを開発し、そのモデルを小さなダム流域(約300 km²)に適用している。しかし、そのモデルがダム下流河道の河床変動問題に対して適用の可能性があるのかどうかという事は評価されていない。

荒川は2940 km²の流域面積を有し、日本において最も重要な流域のひとつである。図-1に示すように荒川上流域には二瀬、浦山、合角ダムが建設されており、二瀬ダムが建設された1960年代以降、掃流砂・浮遊砂の流下量

を減少させている。さらにもう一つのダムが現在建設中である。また、大正から昭和初期にかけて行われた蛇行河道の直線化⁷⁾、砂利採取なども流域での土砂動態に大きなインパクトを与えていると考えられる。このような状況の中、土砂管理という観点から流域単位のモデルの開発が必要とされている⁸⁾。そこで、本研究では土砂動態を直接表現するモデルを開発することを目的として、水収支モデル、土砂生産、土砂輸送モデルを荒川流域に適用し、上流域および河道内の変化が河床変動に与える影響を評価した。

2. 解析方法

(1) 水収支モデル

LUO-TAMAI model⁹⁾は降雨を入力条件とした大流域の水収支シミュレーションモデルであり、関東地方の水循環解析に適用されている。このモデルは流域を構成する陸域と河川が同一のグリッドでモデル化されている。河川および陸域流出の支配方程式は2次元の Diffusive wave model 方程式であり、連続式および運動方程式は以下のように表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = q \\ \frac{\partial z}{\partial x} + S_{fx} = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial y} + S_{fy} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

ここに、 u と v はそれぞれ流速の x 成分と y 成分である。 h は水深、 z は水位であり、 $z = h + z_0$ で表される。 $(z_0$ は地表面の標高である)。 q は単位幅流量である。 S_{fx} と S_{fy} はそれぞれ、 x 方向、 y 方向の摩擦勾配であり、マニング式より以下のように表せる。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{fx} = n_x^2 u |u| \cdot h^{-4/3} \\ S_{fy} = n_y^2 v |v| \cdot h^{-4/3} \end{array} \right. \quad (2)$$

ここに、 n_x と n_y はそれぞれ x 、 y 方向の粗度係数である。

流域内の勾配の小さい平坦なグリッドを正確に追跡するために、スタaggerドグリッドスキームを支配方程式の離散化に用いた。また離散化した方程式を解く数値解法に SIMPLE 法を使用した。

(2) 土砂生産・土砂輸送モデル

a) 陸域の流砂の連続式

浮遊砂成分のみの輸送を考慮した場合の連続式は、

$$\frac{\partial(\bar{c}ih)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}iuh)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}ivh)}{\partial y} = q_{ISSI} - w_{fi} \bar{c}_i \quad (3)$$

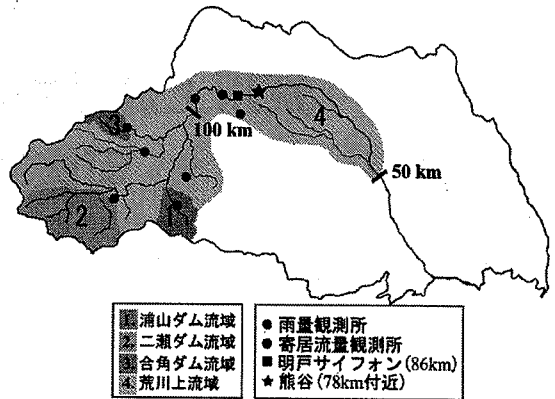


図-1 計算対象流域図

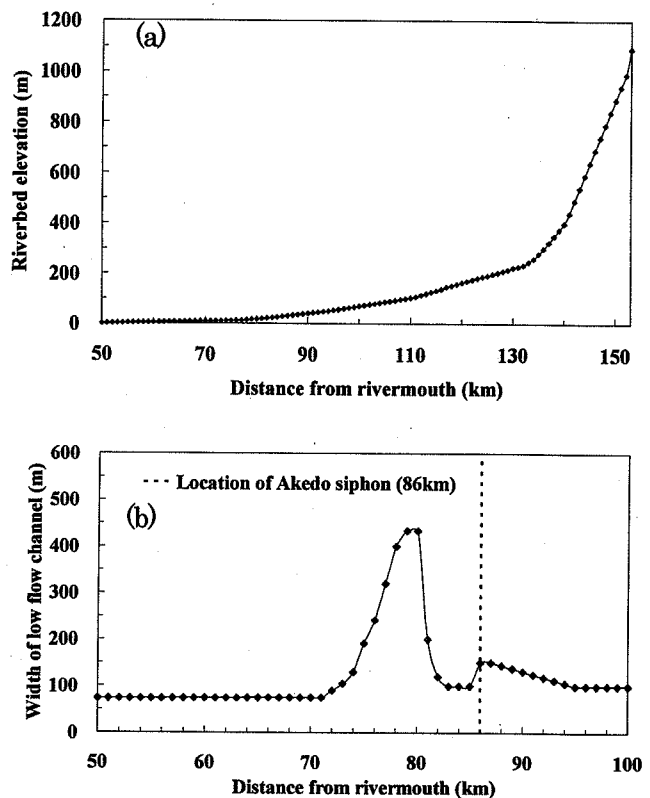


図-2 荒川のダム下流河道の河床標高および低水路幅

(a) 距離標 50～153km 地点における河床標高縦断面図

(b) 距離標 50～100km 地点における低水路幅縦断面図

と表される。ここに、 $\bar{c}$ は浮遊砂の濃度、 l は粒径の種類数、 h は水深(m)、 u 、 v はそれぞれ x 、 y 方向の流速成分(m/s)、 w_{fi} は浮遊砂の沈降速度(m/s)である。また、 q_{ISSI} は浮遊砂の発生項⁹⁾、 w_{fi} は浮遊砂の沈降速度であり、それぞれ、式(4)、式(5) (Rubey⁹⁾の式)を用いて、

$$q_{ISSI} = \gamma_{lu} S_0 Ph \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$w_{fi} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_i + \frac{36 v^2}{d_i^2}} - \frac{6v}{d_i} \quad (5)$$

と表される。ここに、 γ_{hi} は土地利用による相違を表す定数 θ 、 S_0 はグリッド間の最急勾配、 P は降雨強度、 ρ_s は砂の密度(kg/m^3)、 ρ は水の密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 d_i は粒径(m)、 ν は水の動粘性係数(m^2/s)である。

b) 河道域の流砂の連続式

河道域での土砂輸送は浮遊砂と掃流砂に分けて考えている。河道域の浮遊砂の連続式は陸域と同様の方程式が用いられており、以下の式で表される。

$$\frac{\partial(\bar{c}_i h)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}_i u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}_i v h)}{\partial y} = q_{sul} - w_{fi} c_{bi} \tag{6}$$

ここに、 q_{sul} は河床からの浮上量、 C_{bi} は河床近傍での浮遊砂濃度である。

c) 河床変動計算の基礎式

河道での土砂収支の連続式(河床変動計算式)は次のように表される。

$$(1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial(B \sum_i q_{bi})}{\partial x} = \sum_i (w_{fi} c_{bi} - q_{sul}) \tag{7}$$

$$\sigma(1-\lambda) \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i^* (1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial(q_{bi} B)}{\partial x} = w_{fi} c_{bi} - q_{sul} \tag{8}$$

ここに、 λ は河床材料の空隙率、 B は流路幅、 z_b は河床高、 q_{bi} は各粒径の掃流砂量、 p_i は流水中における各粒径の含有率($\sum p_i = 1$)、 σ は交換層厚さである。交換層厚さ σ は山地河川(133～153km 区間)においては、最大粒径と同程度の値を¹⁰⁾、河床波の発達する下流河道(50～86km 区間)においては波高程度と設定した¹¹⁾。流砂量式は、掃流砂には芦田・道上式¹²⁾を、浮遊砂には岸・板倉式¹²⁾を用いた。また、 p_i^* は河床材料の各粒径割合であり、河床高上昇、下降に応じて以下の式を用いた。

$$p_i^* = \begin{cases} p_i, & \text{if } \partial z_b / \partial t \geq 0 \\ p_{oi}, & \text{if } \partial z_b / \partial t < 0 \end{cases} \tag{9}$$

ここに、 p_{oi} は堆積河床における各粒径の含有率である。

(3) 対象流域ならびに解析条件

計算対象流域は、下流河道の河床変動に対する扇状地区間の役割に着目するため、図-1に示すように、大きな支川である入間川合流点(河口から50km 地点)を下流端とした。流域面積は約1000km²である。

流出計算に用いる流域雨量は三峰、横瀬、小鹿野、野上、小川、浦山、合角雨量観測所(7箇所)のデータを用いてティーセン法により設定した。主要な貯水ダムについては、それぞれの貯水ダムの洪水操作規則によって流出流量の計算を行った。また、貯水ダム下流の河川環境を議論する場合は、ダム地点を通過する浮遊砂・ウォッ

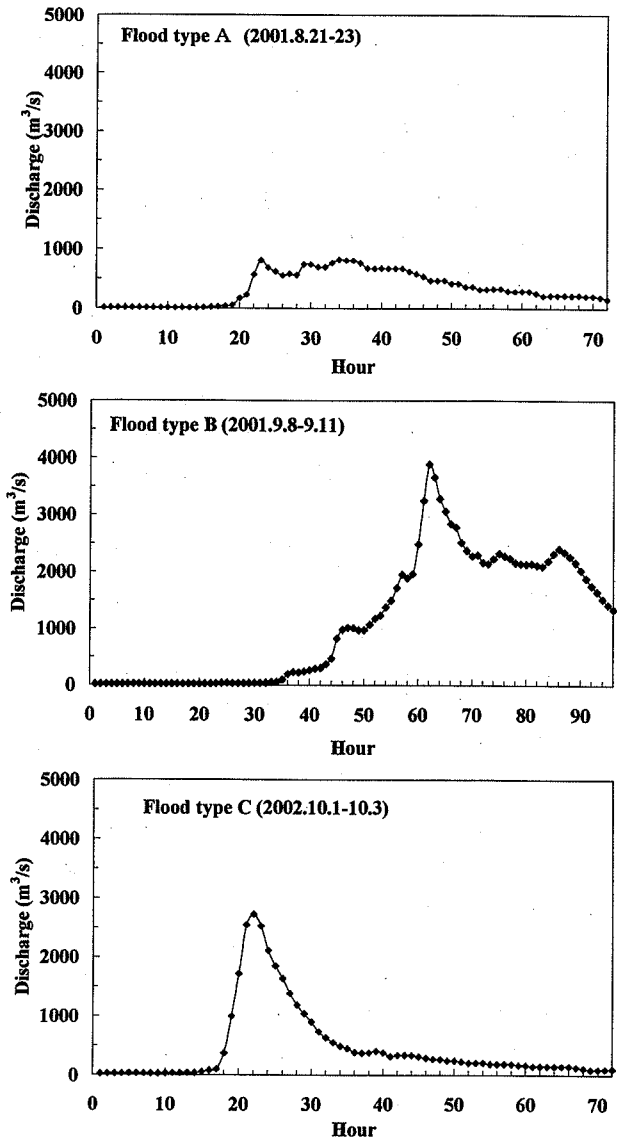


図-3 計算に用いた3種類の洪水タイプ(寄居地点)

表-1 計算対象洪水4種類の洪水の特徴

	Flood type A	Flood type B	Flood type C	Flood type D
生起年月日	2001.8.21-23	2001.9.8-11	2002.10.1-3	2002.7.10-13
ピーク流量 (m³/s)	822	3888	2725	3073
洪水の特徴				
ピーク流量	小	大	大	大
継続時間	長い	長い	短い	短い
流出計算	○	○	○	×
河床変動計算	○	○	○	(Flood type-Cと類似)

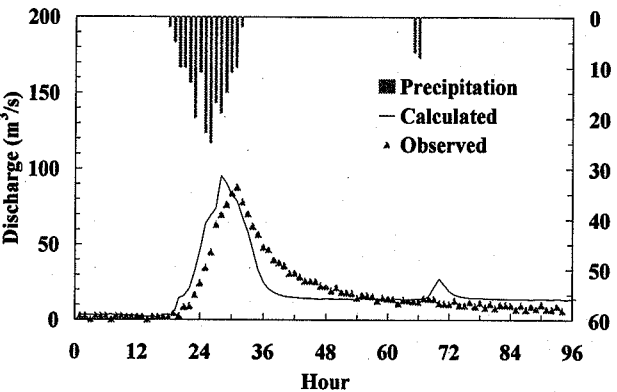


図-4 ダム地点流出解析結果例
(浦山ダム地点 洪水タイプA)

シュロードを含めた解析が必要ではあるが、本研究においては主に河床変動を議論するため、貯水ダム地点で土砂を全量遮断するものとした。

河道グリッドの計算初期河床は国土地理院から1999年8月に発行された1/25000地形図より読み取った。検証に用いる河床変化量は1954～1977年における河床縦断面図の河床変化量を1年当りの変化量に換算して用いた。川幅は山本⁷⁾から低水路幅を設定した(図-2(a), (b)に河床標高ならびに低水路川幅の縦断面図を示す)。粗度係数は山本¹³⁾から、河床勾配の関数として与えた。河床材料の粒度分布は50km～86km区間は山本⁷⁾の実測値から分布形を与えている。また、データのない上流区間では d_{50} 、 d_{16}/d_{84} を河床勾配の関数として粒度分布形を作成し与えた。粒径区分は最小粒径 d_{min} が0.075mm、最大粒径 d_{max} が180mmの間で26種類とした。

流出解析に関しては2001年～2002年において、二瀬ダムが洪水調節を行った4洪水を検討対象洪水とした。その4洪水を表-1に示す。また、河床変動解析に関しては、同表に示すようにピーク流量や継続時間が異なる3洪水(Flood type A,B,C)を検討対象洪水とした(図-3にハイドログラフを示す)。ここで、Flood type DはFlood type Cと特徴が類似しているため河床変動解析では割愛した。

3. 解析結果

(1) ダム流域での検証結果

a) 3ダム流域の流出解析

図-4は2002年に生じた洪水に対する浦山ダム地点でのハイドログラフの解析例を示している。減水期の流量の解析値と実測値で多少の誤差が見受けられるが、総流量は概ね表現できている。図-5は各洪水におけるピーク流量の実測値と解析値の関係を示している。これらの結果からこのモデルはダム地点より上流域での洪水解析には概ね適用可能であると考えられる。

b) 3ダム地点の堆積土砂量

3ダム地点の堆積土砂量を解析するため、期間堆砂量が最大であった342×10³m³(H13合角ダム)の実測値に解析値を合わせることでキャリブレーションを行った。そのキャリブレーション定数を用いた各ダム流域での計算結果を図-6に示す。実測と計算の結果に大きな誤差が生じる場合がある。誤差要因としては、①堆砂量測定法の限界に起因する実測誤差(測線間隔、測点数など)、②ダム流域の小河川を省略したことによる山地からの土砂生産量の計算精度の劣化、③ティーセン法で決定した個々の観測所の支配域の評価が土砂流出に関して必ずしも適切で

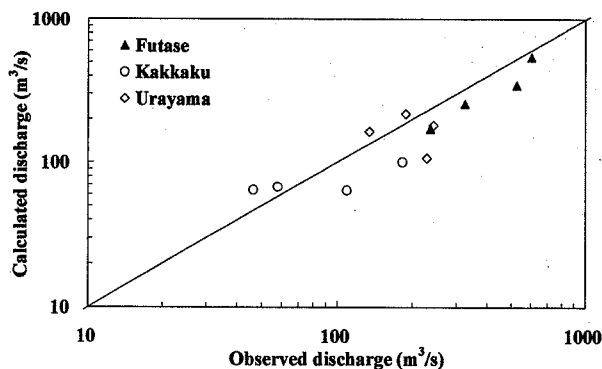


図-5 各ダム地点流量観測所のピーク流量
実測値と流出解析値の比較

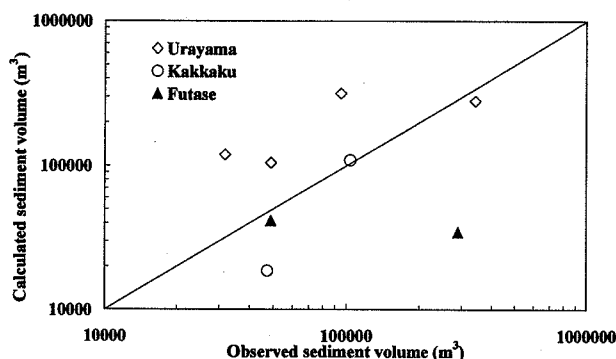


図-6 実績ダム堆砂量とダム地点流入土砂量
(計算値)の比較

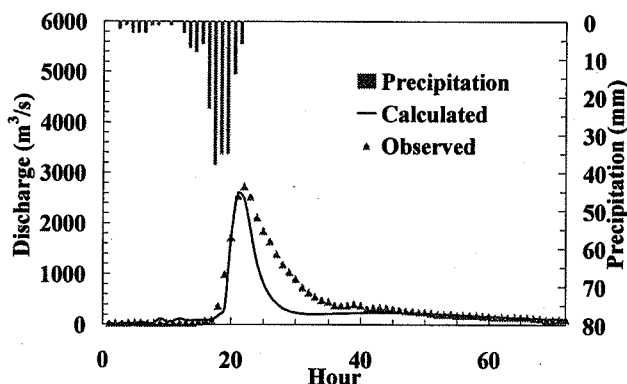


図-7 寄居地点の流出量解析結果例
(洪水タイプC)

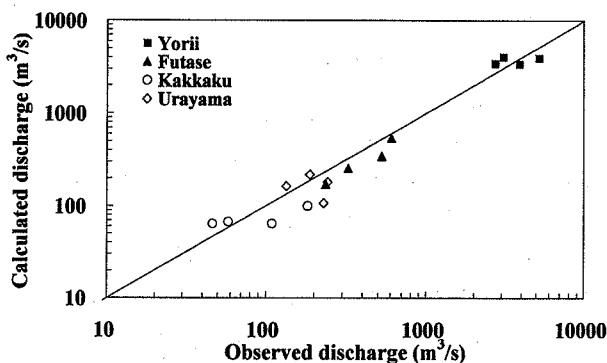


図-8 寄居流量観測所のピーク流量実測値と流出解析値の
比較 (1999年～2002年の洪水データを使用)

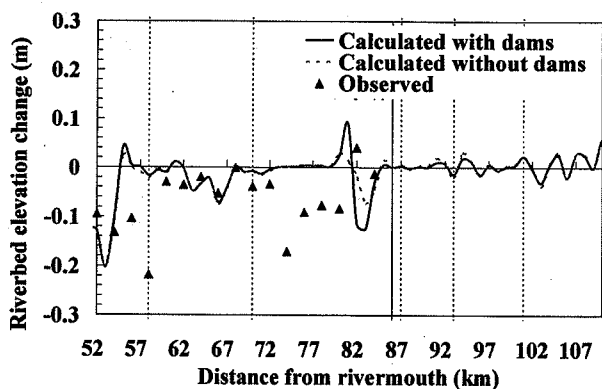


図-9 ダム有り無し条件における河床変動量の比較 (洪水タイプ C)

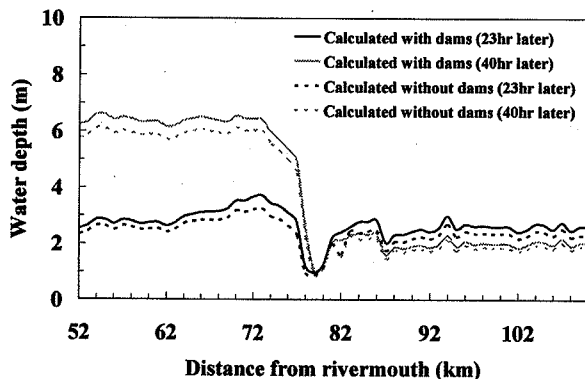


図-10 ダム有り無し条件における水深縦断変化の比較 (洪水タイプ C)

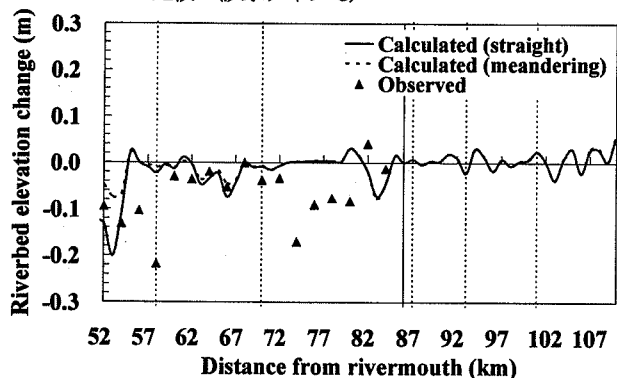


図-11 50km～70km 区間における河道条件が直線・蛇行河道の河床変動量の比較 (洪水タイプ C)

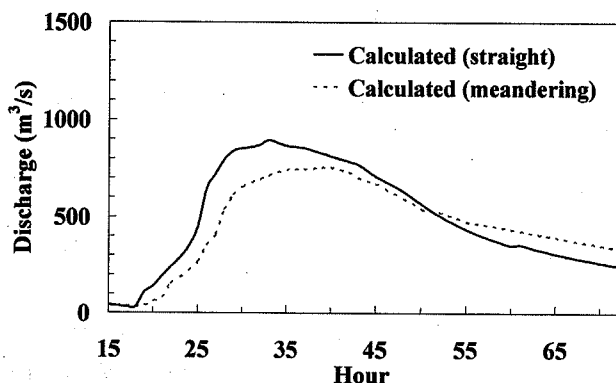


図-12 計算対象区間の下流端付近 53km 地点の流量の時間変化 (洪水タイプ A)

なかったことが考えられる。

(2) 入間川合流点より上流域 (モデル作成全領域) の流出解析

図-7 に 2002 年 7 月洪水時の寄居地点のハイドログラフと解析に用いた流域平均降雨量を示す。図-8 は寄居流量観測所のピーク流量実測値と流出解析値とを比較したもので、各プロットは各洪水のピーク流量を表している。図-7、図-8 からわかるように洪水時の流出はダム流域同様、ダム下流の流域に関しても、概ね表現可能であると考えられる。

(3) 上流域ダム群の有無および河道平面形状の変化が河床変動に与える影響

a) ダム有り無しの影響

上流域のダムの有無が河床変動に与える影響を解析した結果を図-9 に示す。図-9 では河口からの距離が 52～110km までの河道における河床変動量の実測値と計算値を示している。この結果より、下流河道の河床変動に与えるダムの影響はごくわずかであり、80～85km 区間までにとどまっていることがわかる。80～85km 区間まででダムの影響がとどまる原因としては、この区間は川幅が急激に広がる扇状地区間の入り口 (明戸サイフォン付近) にあたる区間であり、扇状地区間での河道内貯留による減速効果が考えられる。また、扇状地区間で貯留された流れは扇状地区間を通過した後、河道が狭まり再び加速される。しかし、急激に川幅が狭まる 74km 地点が下流区間のコントロールポイントとなるため (図-10)、ダムの有無が下流河道での河床変動に及ぼす影響は、図-9 のようにごくわずかなっている。

b) 直線・蛇行河道の影響

図-11 に河口から 50～70km 区間において、①現状の河道長、②河道長を 2 倍にした場合 (蛇行河道を想定)、における河床変動量を比較したものを示す。下流河道直線化の影響は 55km 地点より下流で顕著であることがわかる。この理由として、55km 地点より下流において代表粒径が急激に小さくなっていることが考えられる。また、図-9 と図-11 の直線化区間の河床変動を比べてみると、蛇行河道の直線化が河床変動に及ぼす影響は、ダムの有無が下流河道の河床変動に及ぼす影響に比べ 1～2 オーダー以上の河床変動を生じる。また、80km 地点から下流の扇状地区間において川幅が急激に広がることによって、洪水流は一旦減速されるが、74km 地点からの急激な川幅減少により加速される。直線河道、蛇行河道の条件において最も河床低下を起こしている 53km 地点 (図-9 と図-11 参照) において、蛇行河道と直線河道の場合の流量の時間変化を比較してみると (図-12)、直線河道の方が蛇行河道に比べ、

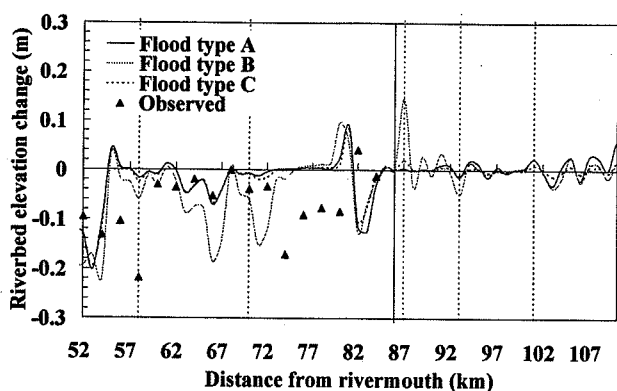


図-13 洪水タイプの違いが河床変動に及ぼす影響

洪水流の河道内滞留・貯留効果が少なくなり、洪水の出足と引きが早くなっていることがわかる。

c) 降雨パターンによる影響

ピーク流量や継続時間の異なる洪水が河床変動に与える影響を解析した結果を図-13に示す。同図より、いずれの洪水タイプにおいても河床低下や河床上昇が生じる区間の傾向に大きな変化は見られない。しかし、同程度の流量規模で、継続時間の異なる Flood type-B, C を比較すると継続時間の長い Flood type-B の方が大きく河床低下が生じていることがわかる。また、代表粒径が急激に小さくなる 55km より下流区間では、いずれの洪水タイプにおいても同程度の河床低下が生じている。今後の荒川における河道管理における重要なポイントのひとつであると考えられる。

4. 結論

本研究によって得られた結果を以下に示す。

- ① 荒川の洪水は流下するに従って、流量・流速が増大するが、熊谷地点の礫河原付近(河口から 80km 地点)の幅広河道部分では、急速に減速され、水深が上昇するような河道内滞留が生じている。
- ② ダムの有り無しが下流河道の河床変動に及ぼす影響を解析した結果、ダムは扇状地区間の入り口(明戸サイフォン付近)までは影響を及ぼしているが、扇状地を過ぎた下流区間ではダムによる影響は少ないと考えられる。
- ③ 熊谷の礫河原地点より下流では、従来は蛇行河道の効果でゆったりと流れていたものが、蛇行河道直線化による縦断勾配の変化と狭い低水路幅で、最加速される。このことは、増水時のみならず、減水時においても河床を削る原因となると考えられる。
- ④ 蛇行河道直線化が河床変動に及ぼす影響は、ダムが下流河道の河床変動に及ぼす影響に比べ、1~2 オーダー以上の河床変動を下流の直線化区間に及ぼす。扇状地より下流区間(52km まで)の河床低下を決定付けているのは蛇行河道の直線化であると言える。

- ⑤ 荒川の扇状地河川区間は上流域の改変を下流に伝播しない役割を果たしている。この扇状地区間は重要であるため、その変化について今後モニタリングしていく必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省荒川上流河川事務所に資料を提供頂いた。また、解析を行うにあたり、羅強氏には御助力頂いた。前田記念工学振興財団平成 17 年度研究助成金(研究代表者・田中規夫)の一部を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Williams, G.P., Wolman, M.G.: Downstream effects of dams on alluvial rivers. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1286, 83 p., 1984.
- 2) Kesel, R.H.: Human modifications to the sediment regime of the Lower Mississippi River flood plain, *Geomorphology*, Vol.56, pp.325-334, 2003.
- 3) Johnson, B.E., Julien, P.Y., Molnar, D.K. and Watson, C.C.: The two-dimensional upland erosion model CACS2D-SED, *J. of the American Water Resources Association*, Vol.36, No.1, pp.31-42, 2000.
- 4) Julien, P. and Rojas, R.: Upland erosion modeling with CACS2D-SED, *International Journal of Sediment Research*, Vol.17, No.4, pp.265-274, 2002.
- 5) Luo, Q.: A distributed water balance model in large-scale complex watersheds (LCW) and its application to the Kanto Region, Ph.D. dissertation of the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2000.
- 6) Luo, Q., Kodama, T. and Takagi, T.: The Basin-wide two-dimensional model of sediment production and transportation for estuary sediment simulation, *Int. Conference on Estuaries and Coasts*, pp.847-858, 2003.
- 7) 山本晃一・安田毅彦・松浦茂樹: 河道特性論ノート [II] - 荒川中流部の河道特性と河川処理 -, 土木研究所資料, 第 1745 号, pp.18-32, 1981.
- 8) 辻本哲郎・藤田光一: 流砂系管理に向けての学術・技術の展開の方向, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp.13-18, 2004.
- 9) 椿東一郎: 水理学 II, 森北出版, pp.233-234, 1974.
- 10) 砂防学会編: 山地河川における河床変動の数値計算法, 山海堂, p.46, 2002.
- 11) 吉川秀夫: 流砂の水理学, 丸善, pp.172-176, 1985.
- 12) 土木学会, 水理公式集 平成 11 年度版, pp.163-168, 1999.
- 13) 山本晃一: 河道特性論ノート [I] - 護岸論のために -, 土木研究所資料, 第 1625 号, pp.101-108, 1981.

(2006. 4. 6 受付)