

1998年洪水による那珂川水系余笹川の 河道変動について

CHANNEL VARIATION OF THE YOSASA RIVER TRIBUTARY OF THE NAKA RIVER DUE TO 1998 FLOOD

中川 一¹・高橋 保²・里深好文³

Hajime NAKAGAWA, Tamotsu TAKAHASHI and Yoshifumi SATOFUKA

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

A severe flood disaster was occurred at the Yosasa River, a tributary of the Naka River, located in the northeast of Tochigi Prefecture due to heavy rainfall on August 27, 1998. The amount of precipitation of 1,229 mm was recorded at the Nasu meteorological observatory, the Meteorological Agency, from Aug. 26 to Aug. 31. Owing to the discharge of a large amount of driftwood as well as bank erosion and river bed variation, many houses and bridges were damaged. In this paper, a channel variation of the Yosasa River was discussed by comparing the aerial photos of before and after the disaster. A Flood runoff analysis by using a tank model was done and one dimensional numerical simulation was carried out to examine the characteristics of the river bed variation of the Yosasa River.

Key Words : heavy rainfall, flood, channel variation, Yosasa River, Naka River

1. はじめに

平成10年の8月下旬, 台風4号がもたらした暖かく湿った空気が日本列島に停滞していた前線に入り込み, 東日本の各地で集中豪雨が発生した。栃木県的那須町にある気象庁那須雨量観測所では, 8月26日から8月31日にかけて1,229mmの降雨を観測し, 特に8月27日午前1時から2時の1時間雨量は90mm, 8月27日21時から28日21時の24時間雨量が640mmに達する集中豪雨となった。これらは既往最大の時間雨量44mm, 日雨量203mmを両方とも遥かにしのぐ記録的な豪雨であった。この豪雨により, 那須町を貫流する余笹川では, 顕著な河岸侵食と多量の流木の流出が生じ, 高津橋や国道4号線の余笹橋など, 多くの橋梁が被災した。ここではまず, 簡単なタンクモデルを用いた流出解析を行い, 洪水規模の推定を行う。ついで, 被災前後の空中写真をもとに, 今回の洪水による余笹川の河道変動について検討する。最後に, 得られた洪水ハイドログラフを用いて河床変動解析を行い, 余笹川の河床変動特性を検討する。

2. 余笹川流域の概要

一級河川那珂川水系余笹川は図-1に示すように, 標

高1,896mの朝日岳に源を発し, 那須高原の中央部を貫流しながら途中で白戸川, 苦戸川(にがとがわ)等の支川の流入をみた後, 黒川と合流し, 川田付近で那珂川と合流する。那珂川との合流点までの幹川長は約33km, 流域面積は約122km²である。

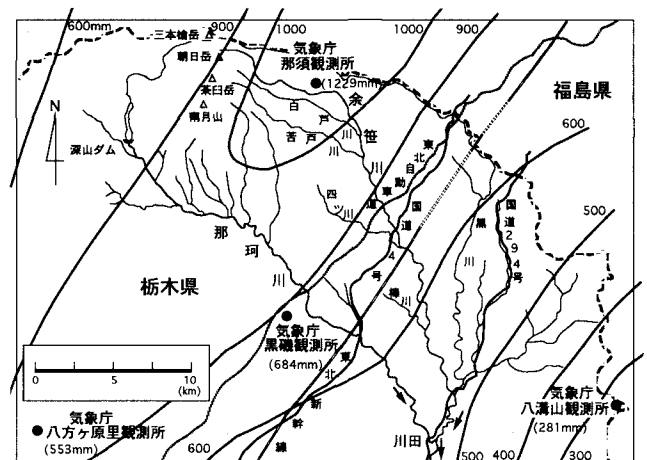


図-1 余笹川流域と連続雨量分布

地質的に見ると, 余笹川上流域源頭部にある那須火山(朝日岳や茶臼岳)は第四紀の鮮新世から更新世の石英安山岩質熔結凝灰岩を基岩とする成層火山であり, これから噴出した角礫岩塊を多量に含む火砕流の堆積物が那

須高原一帯を覆っている。そしてその上を広葉樹林が一面に覆っており、余笹川の一部の河畔林に杉などの針葉樹林が見られる。

余笹川は大部分が自然の掘込み型の河道となっており、平水時のみお筋は其中で蛇行しているところが多い。多くの中洲や蛇行部の内岸側には植生が多く入り込み、一見ただけではそこが雑木林か森林であるような錯覚を覚えるほど、樹木が成長して植生密度が高い。このような所には民地が多くあり、木造の別荘も多く見られる。その内の多くが今回の洪水で流失したり被害を受けたりした。水害が夏休み期間中に発生したため、別荘に宿泊していた人が亡くなるとういう事態も生じた。

3. 降雨状況と流出解析

平成10年8月26日17時から8月31日24時に至る連続雨量の分布は図-1に示すように、那須雨量観測所で1,229mm、黒磯観測所で684mm、八方ヶ原里観測所で553mmというように、北東-南西方向に極めて大きな値を記録した¹⁾。本研究では、東北自動車道より上流域での余笹川の河道変動特性に焦点を絞っているため、水害外力として那須雨量観測所で記録された降雨波形を代表降雨として用いることとしても差し支えないであろう。

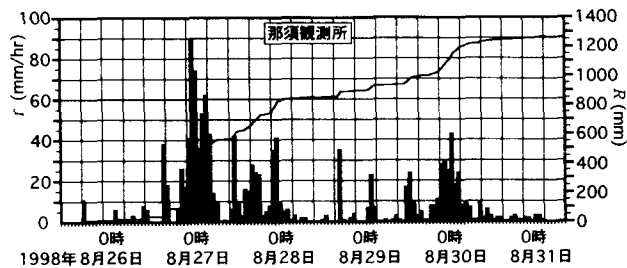


図-2 那須雨量観測所で記録した時間雨量と積算雨量

那須雨量観測所で記録された時間降雨強度と積算雨量を図-2に示す。8月27日午前1時から同日午前2時までの

1時間に90mmの極めて強い降雨を記録している。また、同日午前2時~3時、午前4時~5時、午前5時~6時の3時間にも時間降雨強度が50mmを超える強い雨を観測している。8月29日~8月30日にかけても、比較的強い降雨を記録しており、この二山の降雨が下流の那珂川で二山の洪水を引き起こした。結局、8月26日17時~8月31日24時の約6日間で1229mmという記録的な連続雨量を記録し、6日間で年間の約8割の雨が降ったことになる。

対象とする余笹川の流域は、図-3に示すように、東北自動車道から上流域とする。この部分の流域面積は約38.22km²で、河道長は約17kmであり、北温泉にある砂防ダムAから東北自動車道までは約14km程度である。砂防ダムBの下流約2km地点と大谷開拓橋の上流約1km地点の2ヶ所で余笹川の左岸から小支川が流入し、さらに大谷開拓橋と高津橋の間の右岸側から白戸川と苦戸川が流入している。流出解析には図-4に示すような3段直列のタンクモデルを用いる。降雨データとしては、対象とする流域がほぼ那須雨量観測所の近辺であることから、ここで記録された降雨データを用いることとする。

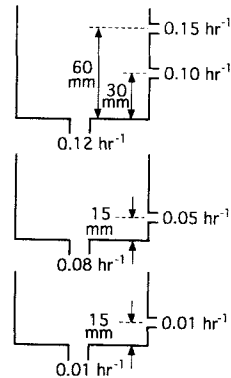


図-4 流出解析に用いたタンクモデル

各タンクの定数を定めるに当たり、余笹川の水位流量観測データが必要となるが、対象区間内に観測点が

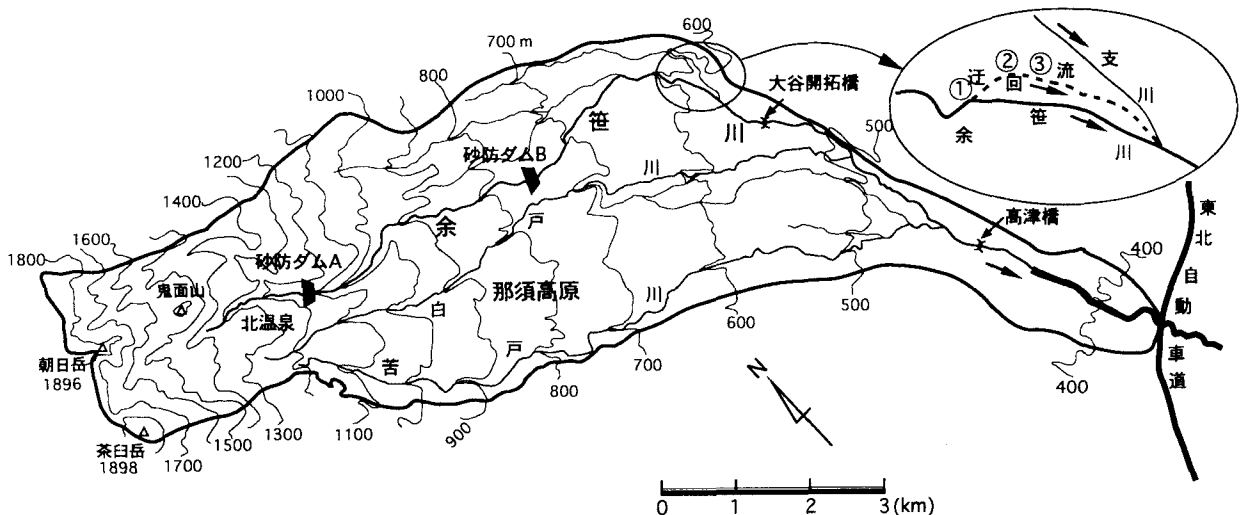


図-3 対象とする余笹川流域

無いことから、ここでは小葉竹²⁾が火山岩地域にタンクモデルを用いる際に推奨している定数を用いる。計算結果を図-5に示す。なお、基底流量はゼロとしている。同図より、東北自動車道地点における洪水ハイドログラフのピーク流量は8月27日午前2時頃と5時頃に発生し、約400m³/s程度となっている。この結果は須賀ら³⁾によって推定されたピーク流量と近い値となっている。流量観測値が無いのでこの計算結果を検証するのは困難であるが、高津橋下流約800mにある流路工付近での洪水痕跡と後述する河床変動計算での最大水位とを比較すると図-6のようであり、比較的両者は良く一致していることからピーク流量はこの程度であったと推察される。

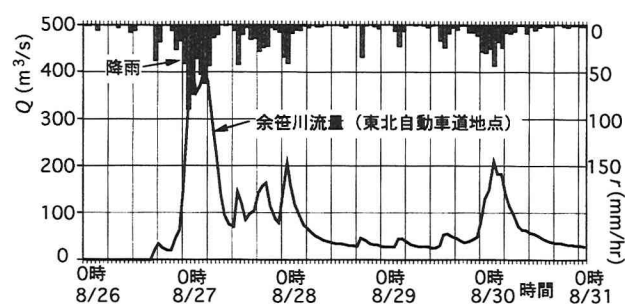


図-5 余笹川の洪水ハイドログラフの計算結果

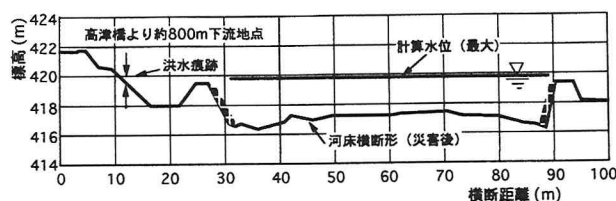


図-6 流路工における計算水位と洪水痕跡水位との比較

4. 河道変動の特徴

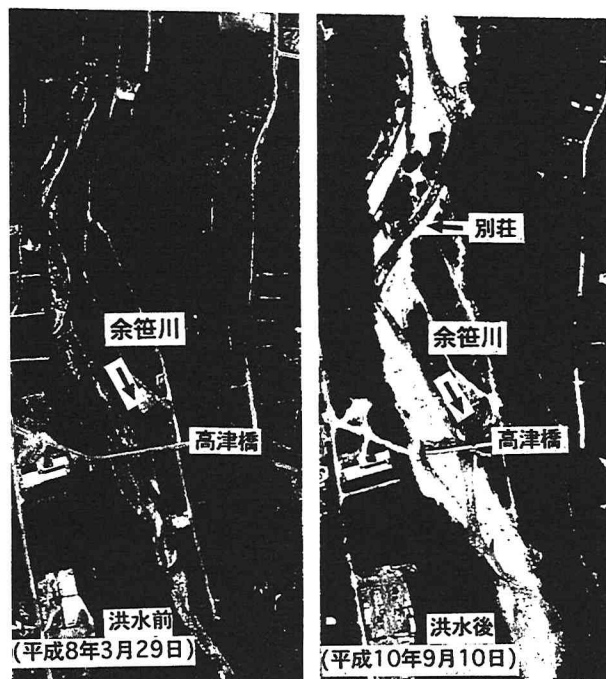


写真-1 高津橋の直上流の河道変動

写真-1は高津橋の上流域の空中写真を示したものである。左側が災害前(平成8年3月29日)の、右側が災害後(平成10年9月10日)の写真である。災害前の写真からは旧河道内には植生が密に入り込んでいるのがわかる。災害後の写真では中洲に部分的に植生が取り残されているが、旧河道と思われる所を洪水は全幅で流れた形跡が伺える。写真中に「別荘」と示した中洲は、災害前には右岸側にのみ、みお筋が見えるが、洪水後の主流は左岸側に寄っている。この中洲の最下流地点には、家屋が奇跡的に残っており、この家屋の直上流には被災した家屋と上流から流れて中洲の樹木に引っかかった家屋の残骸が見られた。

災害直後の高津橋の様子を示したのが写真-2である。流木が引っかかって水位が堰上がり、右岸側(写真手前側)の1スパンを流出させた。引っかかっている流木の多くは溪岸や中洲の侵食によって河道内に取り込まれた長さ約10m、直径約15cm程度のはんの木のような落葉広葉樹が多く、杉は比較的少ない。



写真-2 高津橋の被災状況(栃木県土木部提供)

現在、河川環境を重視する観点から溪畔林や河道内の植生を残す方向にあるが、残すのであれば橋脚等に堰止められないような橋の構造にするとか、流木止めを配置するとか、何らかの流木対策がなされる必要があろう。

写真-3は大谷開拓橋より下流域における災害前後の河道のようすを示したものである。この区間でも災害後の河道は大きく流路を変えていることが分かる。大沢小学校付近では、災害前の流路は右岸側であったが、災害後のそれは左岸側に大きく変動している。この辺りにも別荘が建てられており、その多くが被災した。空中写真からは大谷開拓橋に流木が堰き止められている様子は見られず、事実、この橋は径間長が短い割にほとんど被災していなかった。これは、大谷開拓橋より上流からの生産・流出流量が小さかったためと推察される。

栃木県から提供を受けた資料⁴⁾によると、余笹川の源頭部から大谷開拓橋の間で生産された流量は410m³程度で、その内大谷開拓橋まで流出してきた流量は50m³と見積もられており、生産された流木の9割近くが河道内の樹木間で引っかかるなどして堆積している。このことから、大谷開拓橋では流木の堰止めが発生しにくかったものと考えられる。ちなみに、同資料によると、大谷開拓橋から高津橋の間で生産された流量は、白戸川と苦戸川からの流入分を除いて、940m³もあり、この区間では大規模な斜面崩壊が無いことから、生産流量のほとんど全てが溪畔林と河道内の樹木と考えられる。

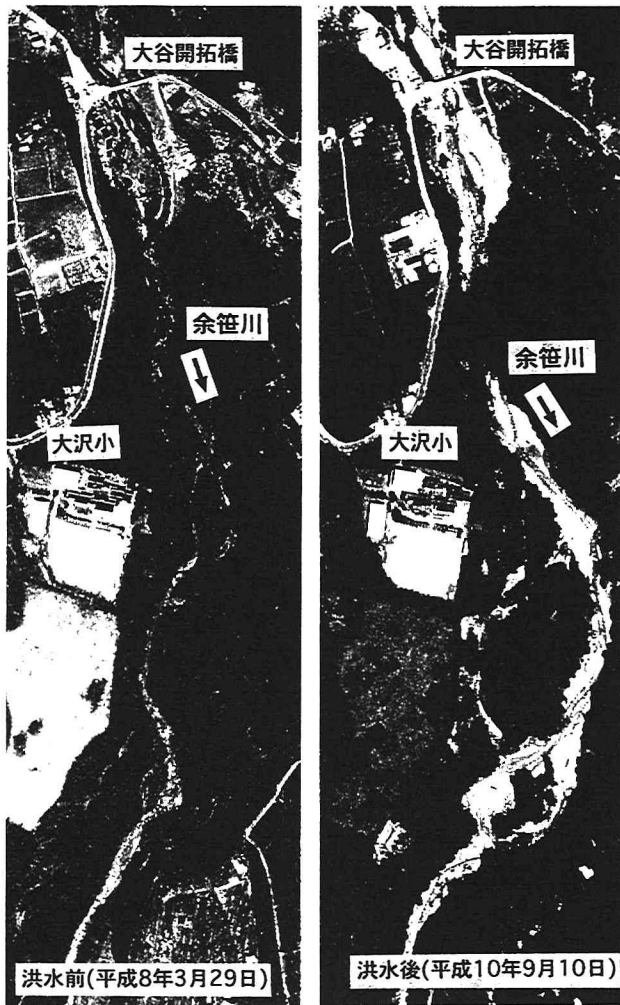


写真-3 大谷開拓橋の直下流の河道変動

大谷開拓橋より上流では、図-3 中の拡大図に示したように余笹川は①の所で分岐して流れた。災害後、河道内にはうずたかい流木の山が数カ所に形成されていた。これらの流木の多くは落葉広葉樹のものであり、杉などの針葉樹の流木はわずかであった。①地点には直径十数 cm～数十 cm の礫が新たに堆積しており、強い掃流力がこれより上流で生じていたものと推察される。迂回して流れた②の地点は周辺が杉林であり、溪岸崩壊によって多くの杉が倒れていた。これらの杉は倒れてはいたものの流出しておらず、周辺の様子からも杉の木が流木となって流出した形跡は見られなかった。

この地点より上流には砂防ダム B (谷止工) (図-3 参照) がある。このダムの直上流には小規模な土石流堆積物が見られたが砂防ダムはほとんど満砂しているものの、袖部では満砂しておらず、土石流がこのダムまで達したような形跡は見られなかった。したがって、このダムから下流への大規模な土砂流出は無かったものと考えられる。

砂防ダム B からさらに上流には北温泉 (図-3 参照) があり、その直上流には砂防ダム A が設置されている。砂防ダム A は満砂しているが、この温泉での被害はなかった。

以上より、東北自動車道より上流域での余笹川の河道変動は砂防ダム B から下流域で顕著であり、溪岸侵食による土砂生産とこれによる河床変動が余笹川の河道変動を支配していると考えられる。そこで、河床変動については次章で検討することにする。また、溪畔林の流木化と流木の橋梁部での堰き止めが、河床変動および溪岸侵食に何らかの影響を受けたものと推察されるが、これについてはほとんど研究がなされておらず、不明なところが多い。将来、これらの影響を考慮した山地域の河道計画に対する指針や橋梁設計指針等が与えられるよう、今後のさらなる研究が望まれる。

5. 河床変動解析

(1) 計算方法

局所的に急勾配地点が多数存在することから、土石流、掃流状集合流動および掃流の流砂形態が現れることを想定し、著者らがこれまでに開発してきたモデルを援用する⁹⁾。

土砂濃度 C の大きさに応じて用いる運動方程式は以下のようなものである。

土石流の場合 ($C > 0.42 C_*$)

$$q = \frac{2}{5d} \left[\frac{g \sin \theta}{a \sin \alpha} \left\{ C + (1-C) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

掃流状集合流動の場合 ($0.02 < C \leq 0.42 C_*$)

$$q = \frac{0.7 \sqrt{g}}{d_L} h^{5/2} \sin^{1/2} \theta \quad (2)$$

乱流の場合 ($C \leq 0.02$ あるいは $h/d > 30$)

$$q = \frac{1}{n_m} h^{5/3} \sin^{1/2} \theta \quad (3)$$

ここに、 C : 流れの体積土砂濃度、 C_* : 河床材料の静止体積土砂濃度、 q : 流れの単位幅流量、 d : 砂礫の代表粒径、 h : 流れの流動深、 g : 重力加速度、 σ : 砂礫の密度、 ρ : 水の密度、 θ : 水面勾配、 n : Manning の粗度係数である。なお、河道幅に比べて流動深は小さいので、径深を流動深に置き換えて用いている。

全容積の連続式は以下のようなものである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial qB}{\partial x} = i + \frac{q_{in}}{B} \quad (4)$$

ここに、 B : 川幅、 i : 侵食 ($i > 0$) あるいは堆積 ($i < 0$) 速度、 q_{in} : 横流入流量、 t : 時間、 x : 距離である。

砂礫の連続式および河床位方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial (Ch)}{\partial t} + \frac{\partial (qCB)}{B \partial x} = i C_* + \frac{q_{sin}}{B} \quad (5) \quad \frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (6)$$

ここに、 q_{sin} : 横からの流入流砂量、 z : 河床位である。

侵食および堆積速度 i は次式で表す。

$$i = \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{q}{d} \quad (i > 0 \text{ 侵食}) \quad (7)$$

$$i = \delta_a \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{q}{d} \quad (i \leq 0 \text{ 堆積}) \quad (8)$$

ここに、 δ_e, δ_d :定数である。 C_∞ はその地点の渓床勾配で流し得る石礫濃度(平衡濃度)であり、次のように設定する。

($6 > 12.8^\circ$ の場合)

$$(6 > 12.8^\circ) C_\infty = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (9)$$

$$(3.3^\circ < 6 \leq 12.8^\circ) C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \right\}^2 \quad (10)$$

$$(6 \leq 3.3^\circ) C_\infty = q_B / (hu) \quad (11)$$

ここに、 ϕ :砂礫の内部摩擦角、 q_B :流砂量であって、次式のように表される⁶⁾。

$$\frac{q_B}{\left\{ (\sigma / \rho - 1) g d^3 \right\}^{1/2}} = \frac{1 + 5 \tan \theta}{\cos \theta} \sqrt{\frac{8}{f}} \left(1 - \alpha^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \alpha \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (12)$$

ここに、 f :抵抗係数、 τ_* 、 τ_{*c} :それぞれ無次元掃流力、無次元限界掃流力、 α :係数である。

(2) 計算条件

現地調査によると砂防ダムBより上流では、流域面積が比較的小さいので側岸侵食が大規模に生じるような洪水が生じなかったためか顕著な土砂流出は見られなかった。栃木県の災害調査報告書⁷⁾によると、これより下流への土砂流出量は約 130m^3 (実質)と見積もられている。そこで、この区間では洪水流出は計算するか河床堆積土砂は移動しないものとし、これより下流については一律に土砂体積厚さが 4m で、その下は基岩となっていてこの厚さ以上の侵食は進まないものと仮定して河床変動解析を行う。ただし、本川での河道変動が卓越していることから、支川からの土砂流入は考慮せず、支川からの洪水の流入のみを考慮する。なお、同報告書によると白戸川および苦戸川からの流入土砂量は実質でそれぞれ $8,385\text{m}^3$ および $4,875\text{m}^3$ であり、東北自動車道近傍での余笹川本川の流出土砂量は $121,355\text{m}^3$ であることから、支川から約1割程度の流入土砂量を無視したことになる。

河道幅 B については次式のレジーム式を用いた。

$$B = \beta^2 q \quad (13)$$

ここに、 β は係数であり、 $\beta = 4$ とした。なお、初期水みち幅は災害前の空中写真をもとに一律 10m とし、式(13)より時々刻々求まる川幅の変化量に応じた側岸の土砂量を横方向流入流砂量 q_{sin} とした。ただし、流量が低減してレジーム川幅が減少する場合も最大川幅をとるものとしている。計算に用いた諸量は以下のようである。河床材料の代表粒径 d として、代表地点での資料をもとに 10cm とした。基礎式に含まれる諸定数については $n = 0.04$ 、 $\delta_e = 0.0007$ 、 $\delta_d = 0.0001$ 、 $\sigma = 2.65\text{g/cm}^3$ 、 $\rho = 1\text{g/cm}^3$ 、 $\tan \phi = 0.7$ 、 $C_* = 0.65$ を用いた。

(3) 計算結果

計算より得られた最大レジーム川幅と災害後の空中写真より得た河道幅との比較を図-7に示す。大谷開拓橋

より上流では算結果の川幅が実測値より過大に評価されているが、これは実測値の河道幅を求める際に、流路が分岐している場合に河道幅をどのように定義するか判断できなかったため、大きい方の河道幅を採用した事による。同様の理由により、これより下流では河道が分岐した箇所では実測河道幅は計算値の最大レジーム川幅より小さく、変動範囲が大きい、計算値は平均的な実測河道幅に近い値となっている。

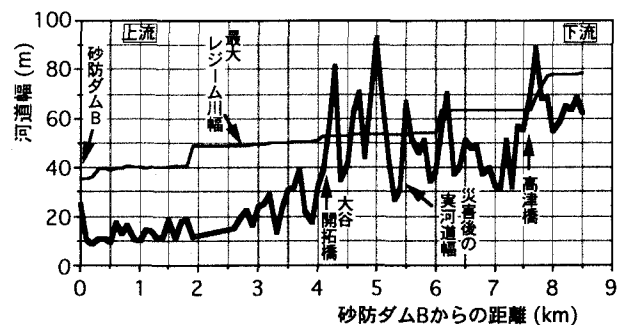


図-7 最大レジーム川幅と災害後の河道幅の比較

河床変動計算結果を図-8に示す。なお、河床変動量は縦軸方向に10倍拡大して表示している。同図より、砂防ダムB地点直下流から大谷開拓橋の上流約 1km の区間では侵食傾向にあるが、大谷開拓橋付近から高津橋付近までの区間は堆積傾向にあり、高津橋より下流ではほとんど河床変動を示しておらずほぼ平衡状態にあることが分かる。栃木県の災害調査報告書によると、詳細な数値を判読できないが、支川1の合流点直下流では侵食傾向、大谷開拓橋直上流ではやや堆積傾向、白戸川合流点~高津橋では顕著な堆積傾向にあり、計算結果の傾向とほぼ合致している。



図-8 余笹川の河床変動計算結果

図-9は東北自動車道付近における流出土砂量(実質)の総和および単位幅流砂量の時間変化を示したものである。8月27日午前0時頃から下流端で土砂流出が始まり、8月28日午前0時頃まで強い土砂流出が続き、この間で約 9万m^3 程度(実質体積)の土砂流出となっている。単位幅流砂量の時間変化は洪水ハイドログラフに応じた変化を呈し、洪水ピーク時には $0.04\text{m}^3/\text{s}$ 程度に達している。その後、8月30日の洪水流出がはじまるまで土砂流出はほとんど止まっているが、この第2波の洪

水で 2 万 m^3 程度 (実質体積) の土砂流出が生じ、結局 12.8 万 m^3 程度の土砂流出があったのではないかとこの計算結果になっている。これは、災害調査報告による約 12.1 万 m^3 (支川からの流入土砂を含んでいるが、これが本川から全て流出したかどうかは不明) に近い値となっており、ここで行ったような簡便な解析方法でもある程度流出土砂量を算定することが可能であると推察される。

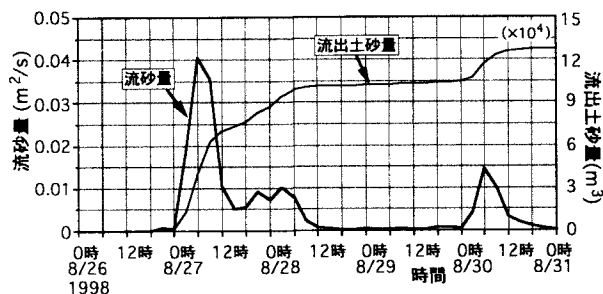


図-9 余笹川からの流出土砂量の計算結果

この計算では、側岸侵食を直接的には考慮しておらず、最大レジーム川幅まで側岸の土砂が流入するとしているために実際の河岸侵食土砂量より過大に侵食量を評価している可能性がある一方、支川からの流入土砂量を考慮していないために土砂量を過小に評価しているという面もあり、不確実な要素を多分に含んでいるが、余笹川における侵食および堆積傾向にある河道区間がある程度再現されているものと考えられる。

6. おわりに

平成 10 年 8 月末に発生した余笹川の河道災害を検討するにあたり、洪水流出解析および河床変動解析を行うとともに、災害前後に撮られた空中写真をもとに、河道変動の実態を示した。極めて多量の降雨があったにもかかわらず、山地域での大規模な斜面崩壊は発生しておらず、広葉樹林の根茎の緊縛力の強さがあらためて認識された。それでも異常な豪雨に対応した洪水は発生しており、旧河道を含む川幅全体で洪水が流下し、顕著な側岸侵食が発生して河道変動を引き起こした。災害前には河道内の砂礫堆や弯曲部内岸側に密に植生が繁茂していたが洪水で流木化し、流下途中で橋脚に堰き止められて橋梁の被災原因および洪水氾濫の原因ともなった。

現在、河道内の植生を残し、生態に配慮した自然河川を創造していこうとする河川管理形態へ変わろうとしている。河道内の植生が流木化して災害を助長する危険性があることを十分認識し、また、多自然型河道ということで落差工や流路工を画一的に設けることも難しくなっていることから、治水上安全ではあるが、景観や生態に十分配慮した砂防工作物の配置を考えていかなければならない。そのような目的を満たすにはどのような方法があるか、知恵を出していかなければならない時である。

例えば、河床には帯工のようなものを複数箇所に配置

し、災害後の河床侵食に対応するとともに落差をつけないことで生態系にも優しい河道とするとか、上流域に残った最大粒径の土砂を、深さ方向および横断方向に複数個配置することで、根固めと側岸侵食防止に利用するなど、自然環境に配慮しつつ災害防止にも役立つような方法も考えられよう。

現在、余笹川の旧河道内では別荘地の分譲が行われており、既に別荘が何軒か建てられていて、その内の多くが被災した。山地域では河道内が民地である所が多くあり、このような所の土地利用規制をどのようにやっていくのか、住民の自己責任をどのように考えるか、行政側の役割はどこまでか等、今後検討しなければならない問題が多く発現した。

なお、本研究ではレジーム川幅の変化に応じた側岸からの横方向流入流砂量を便宜的に取り込んだ河床変動解析を行っているが、今後、側岸侵食機構を組み込んだ流路変動解析についても検討したいと考えている。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、栃木県土木部砂防課の加藤孝之、北川貴之の両氏には現地調査に同行していただき詳細な説明を受けるとともに、膨大な資料を提供していただいた。また、災害前後の空中写真を入手する際にも栃木県の便宜を受けた。さらに、本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究 (B) (I) (代表 東北大学 真野明教授) の援助を得た。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) 栃木県土木部砂防課: 平成 10 年 8 月末豪雨による災害, 栃木県パンフレット, 1998.
- 2) 小葉竹重機: 河川流域における洪水の形成過程に関する研究, 京都大学学位論文, 1979, pp. 125-129.
- 3) 須賀亮三・池田裕一・伊藤和典: 余笹川の洪水災害, 文部省突発災害研究成果報告書「1998 年南東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究」, 1999, pp. 53-69.
- 4) 栃木県提供資料: 余笹川流木生産・堆積状況調査報告, 株式会社ダイヤコンサルタント, 1998, p. 37.
- 5) 中川 一・高橋 保・澤田豊明・里深好文: 計画土石流の設定と避難計画, 京大防災研年報, 第 39 号 B-2, 1996, pp. 347-371.
- 6) Takahashi, T.: High velocity flow in steep erodible channels, Proc. of XXII Congress, IAHR, 1987, pp. 42-53.
- 7) 栃木県大田原土木事務所・株式会社ダイヤコンサルタント: 平成 10 年度設計業務委託 (国庫補助災害関連緊急砂防事業費) (施設配置計画) 報告書, 1995, 5 月, pp. 1-186.

(1999. 9. 30 受付)