

余笹川にみる低頻度大洪水による 横侵食性河道変化の実態とその考察

PRACTICAL CONSIDERATION ON BANK EROSION AND CHANNEL SHIFT
BY A BIG FLOOD OF LOW FREQUENCY IN THE YOSASA RIVER

伊藤和典¹・須賀堯三²・池田裕一³

Kazunori Ito, Kyozo Suga, Hirokazu Ikeda

¹ 学生員 宇都宮大学大学院 工学研究科博士前期課程 建設学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7丁目)

² フェロー会員 工博 宇都宮大学教授 工学部 建設学科 (同上)

³ 正会員 博(工) 宇都宮大学助教授 工学部 建設学科 (同上)

The Yosasa river of northern Totigi experienced the biggest flood disaster by the heavy rainfall, on August 26, 1998. The natural banks of the Yosasa river have special characteristics for lateral erosion, and therefore, such special phenomena occurred, that floodwater seriously eroded the river banks and the width of channel became three to five times as wide as the original one. Some new channels were also formed in the event. In the occasions, numerous sands and gravels, and also tremendous drift timbers, were flushed out. In this paper, the bank erosion by the biggest flood of low frequency in the Yosasa river was studied based on the results of field survey.

Key Words : Bank erosion, Channel shift, Big flood disaster of low frequency, Yosasa river,

1. はじめに

栃木県北部を流れる那珂川上流支川余笹川では平成 10 年 8 月 26 日 22 時からの 12 時間に 472mm、最大時間雨量 90mm の局所的な集中豪雨により 60 年ぶりの大洪水が発生した。今回の洪水で余笹川の河道では、数時間のうちに流路幅が 3~5 倍に拡幅し、著しいわん曲部では洪水流が直進し新流路の形成が見られた。さらに流路幅の拡幅と新流路の発達過程で大量の土砂生産や流木生産があった。洪水氾濫を受けた土地では砂や礫・大径の玉石が残り、多くの流木が残存した。通常の河川で、これほどの顕著な横侵食が行われた例は極めて少ない。

著者ら^{1) 2) 3) 4)}は余笹川では大洪水の発生頻度が低いことから(過去の同程度の洪水は約 60 年ほど前)、樹木の繁茂等により耐侵食性が増大し侵食が生じにくい河道となっており、その結果、不安定な非平衡河道が形成されていて、2 粒径河道のため、横侵食を受けやすい河道となっていると指摘している。蛇行が非平衡の形状のままで固定しているのは植生の繁茂や小・中洪水時の土砂の堆積により側岸部の耐侵食性が増大しているためであり、横侵食性が顕著な原因は山地部沖積地内の土砂が侵食されやすい火山灰性の堆積砂と大径の礫との混合であることが主要な原因であると考えられる。中川ら⁵⁾はタ

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っている。また余笹川上流部付近で河床変動計算を行っている、余笹川の河床変動特性を検討している。

本研究では余笹川の横侵食に着目し、その実態を把握するために現地調査を行った。また洪水前後の航空写真や洪水後の横断面図などを収集し余笹川における横侵食の実態を定量的に把握し、低頻度大洪水による横侵食性河道変化の実態の解明とその考察を行う。

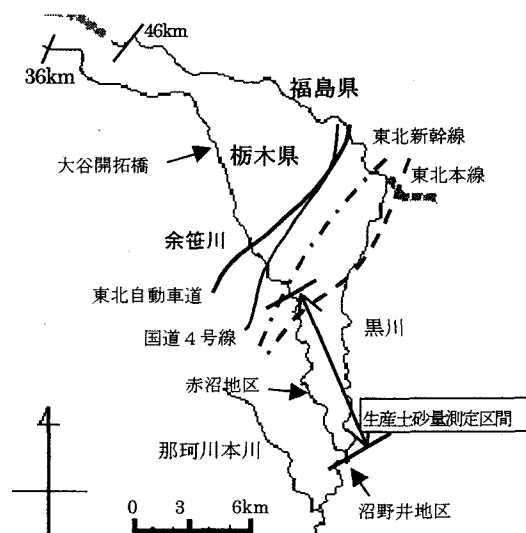


図-1 余笹川の位置と生産土砂量測定区間

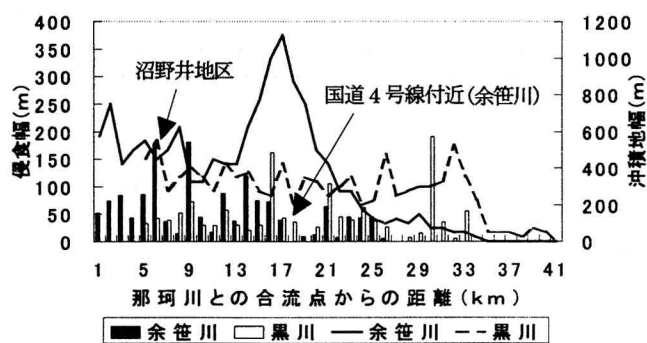


図-2 余笹川と黒川の侵食幅と沖積地幅

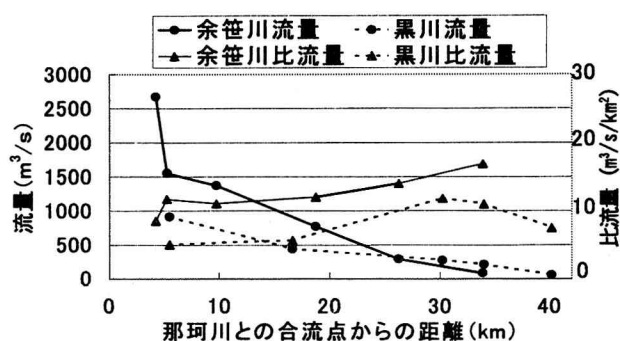


図-3 余笹川と黒川の洪水時ピーク流量と比流量

2. 横侵食性河道について

通常侵食性河道といえば山地部の侵食河道や古い地質地帯の侵食河道であり、主に鉛直方向の侵食である。縦侵食河道がこれに該当し直線的なものと穿入蛇行とがあるが比較的安定したものである。これに対し、横侵食河道とは侵食河道でありながら縦侵食河道のように水深に対して流路幅の狭い河道ではなく、むしろ水深に対して流路幅が広がる方向にほとんど一方的に侵食が進行する河道のことである。全国的にみて、この種の河道は多くないが栃木県には今回洪水のあった余笹川や黒川のほかに鬼怒川やその支川の田川、あるいは思川支川の黒川などが挙げられる。

余笹川では、那須火山の水源地帯における土砂生産活動の活性化に伴って、これらの流出土砂が余笹川や黒川の溪谷を埋め、前者においては幅400～1000mの、また後者においては200～500mの沖積地を形成されている。この過程では土石流の発生もあった。やがて、上流山地では崩壊終了と同時に安定期に入り、植生繁茂に伴う耐侵食性の増大が流出土砂量の減少に拍車をかけることとなった。そのため、これまでの堆積河道はいつてんして侵食河道に変化した。

今回の洪水は、100km² オーダーの流域で比流量12程度のピーク流量(図-3)であり、かつ上流山地域からの土砂や流木の流出は無視しうるほどのものであり、洪水の水量は豪雨地帯の洪水と比べ、異常といえるほどのものではない。洪水被害を顕著なものとした原因は、60年ぶりの大洪水で、かつ、被災対象に対して既往最大ということもあるが、余笹川が著しい横侵食河道であることに負うことが多くない。横侵食量は他に例をみない規模となり、非平衡の不安定蛇行河道ゆえに新規に大規模な侵食河道がところどころに形成され、大量の土砂生産と流木生産が行われた。このことが今回の洪水の最注目点であると考えられる。

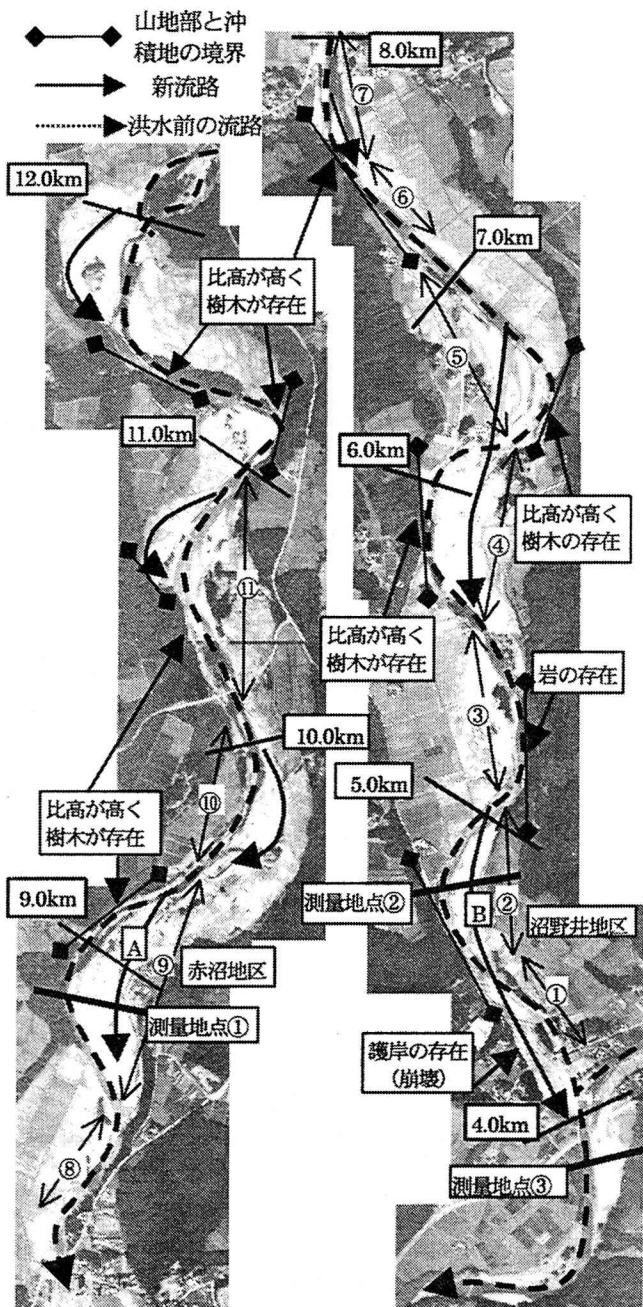


写真-1 余笹川の航空写真(4.0～12.0km 地点)

3. 河道の平面形状の変化

(1) 横侵食の状況

図-2は余笹川と黒川の侵食幅と沖積地幅の測定結果である。余笹川の中・下流部では流量が大きいことと共に、沖積地が広く河道は沖積地内を自由奔放に蛇行して

いるため侵食幅が広い（沼野井地区付近で余笹川の流量 $1550\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $12\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 、図 - 3）。写真 - 1 は余笹川的那珂川との合流点から 4~12km 区間の航空写真である。特に侵食幅の広い蛇行部では洪水流のカットオフ（ショートカット）による新流路の形成が多くみられ、洪水前の流路と新流路の両側から侵食されて侵食幅が広い傾向がある。

図 - 4 は洪水前の余笹川の蛇行の平面形状を沖積地の中心を基準として測定した結果である。測定区間は特に蛇行の激しい余笹川下流部（那珂川との合流点から 0~16km）の区間である。河道は沖積地内を自由奔放に蛇行しており、その蛇行は縦断的に非平衡で不規則である。蛇行振幅は沖積地の中心を軸におよそ 200 m 前後である。

図 - 5 は測量地点①（余笹川、赤沼地区）の横断面図である。この付近は侵食幅が最も広い地点であり、洪水時の川幅は約 200m であった。この付近では洪水流は写真 - 1 の矢印 A のようにカットオフ（ショートカット）し、左岸側が侵食されて新流路が形成されている。新流路の形成されていた地点は水田であったが、今回の洪水で大量の土砂が堆積していた。その堆積厚さは約 50cm ほどであった。図 - 6 は測量地点②（余笹川、沼野井地区）の横断面図である。この付近でも写真 - 1 の矢印 B のように洪水流はカットオフ（ショートカット）し左岸側に新流路が形成されていた。この新流路と洪水前の流路の両岸が共に洪水流による侵食を受け多くの土砂生産があった。小さな粒径の土砂や礫は流出し大径の礫や玉石が残存し新規のペーブメントが形成されていた。図 - 7 は測量地点③（余笹川、黒川合流後）の横断面図である。矢印のように洪水流は流れ右岸側が多少横侵食を受けた痕跡はあったがわずかなものであった。左岸側には細かい土砂や砂が大量に堆積していた。この付近は新流路が形成された先ほどの地点より下流部であり、黒川が合流後の地点で流量・流速共に増加しているが、合流後 1.5km 区間の間はほとんど侵食を受けていない。侵食を受けていない原因は洪水前の流路と洪水時主流部の流れ方向の不一致の度合いが小さいということと、流水が衝突する側岸の耐侵食性が大きかったことが原因であると考えられる。

(2) 新流路の形成状況

蛇行している地点では新流路の形成が多く見られる。新流路の大部分は洪水前の河道の蛇行部外岸側が沖積地と山地部との境界である。それ以外としては流れの直進（ほとんど射流）によるものである。蛇行部の外岸側が沖積地と山地部の境界であるとき山地部の耐侵食性が大きいいためその方向には侵食がおこなわれずに蛇行部の内岸側への侵食や新流路の形成がみられる傾向がある。流れの直進によるものとしては蛇行部の外岸側が山地部で

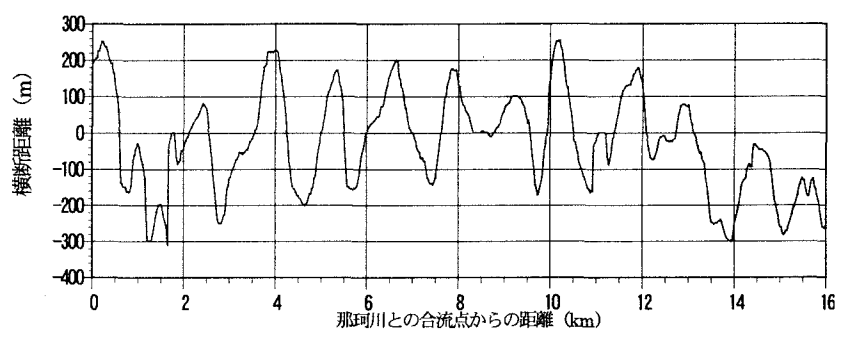


図 - 4 余笹川の蛇行形状（沖積地の中心を基準として）

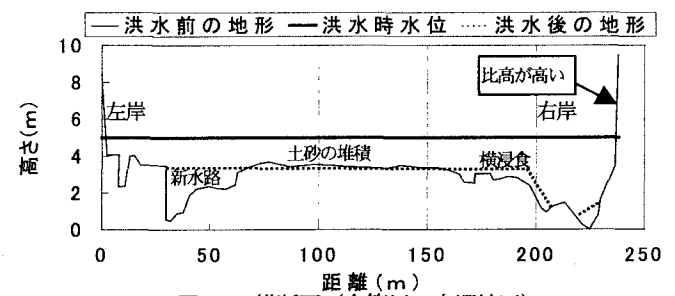


図 - 5 横断面図（余笹川、赤沼地区）

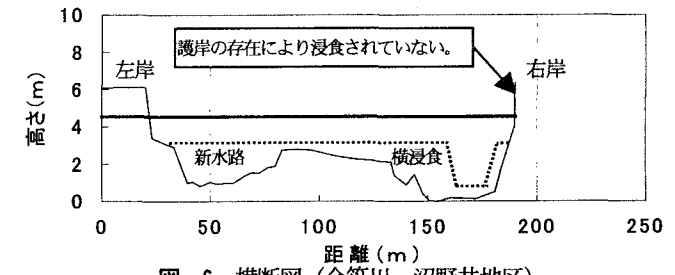


図 - 6 横断面図（余笹川、沼野井地区）

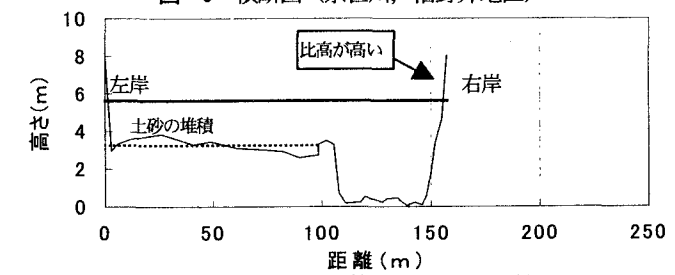


図 - 7 横断面図（余笹川、黒川合流後）

はなく沖積地であるとき流水の影響を受けやすい蛇行部外岸側が侵食され新流路が形成されている。前者の場合の新流路は洪水前の流路の内岸側をカットオフ（ショートカット）するため直線的であり、後者の場合は蛇行部外岸側に新流路が形成され、その後もとの河道に戻ろうとするため湾曲している。

今回の洪水で沖積地と山地部との境界が極端に変化するということがあった（写真 - 1、山地部と沖積地との境界参照）ことから、沖積地と山地部との境界付近では山地部の耐侵食性が高いようである。侵食があまり生じていない地点では比高が高い地点が多い。これらの地点では樹木の繁茂や小洪水時の土砂の堆積、岩の存在などにより側岸部の耐侵食性が増大して横侵食を抑え、これまで下方向に縦侵食されていたため比高が高くなった

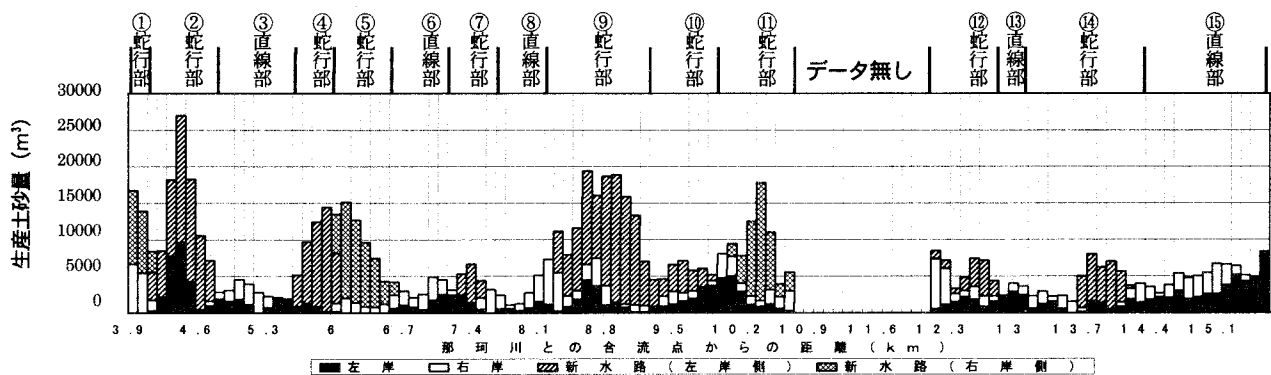


図-8 余笹川の生産土砂量

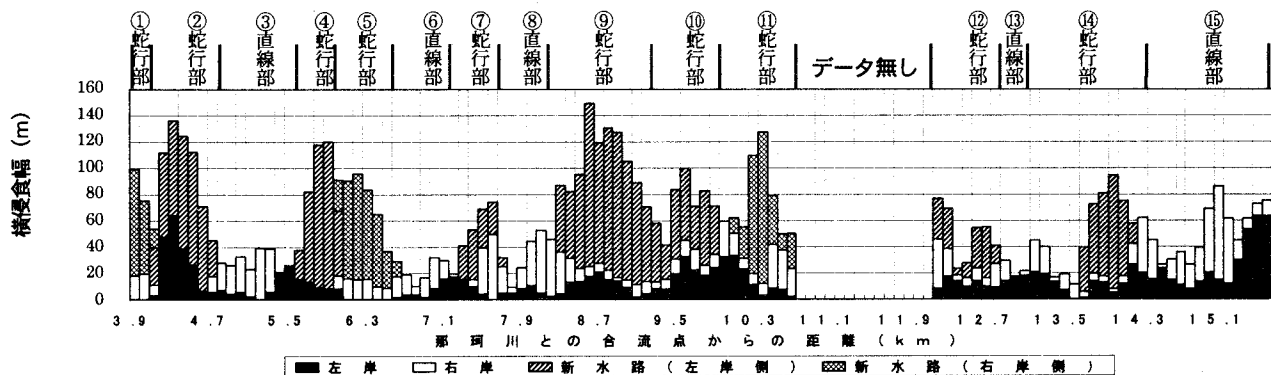


図-9 余笹川の横侵食幅

表-1 各地点におけるの河道の蛇行形状

地点番号	蛇行角 (°)	曲率半径 (m)	蛇行振幅 (m)	蛇行半波長 (m)
①	19	550	75	500
②	50	300	200	600
④	68	250	175	500
⑤	71	188	180	400
⑦	53	350	225	625
⑨	50	375	175	600
⑩	48	450	150	725
⑪	40	525	100	700
⑫	30	200	75	250
⑭	60	275	225	550

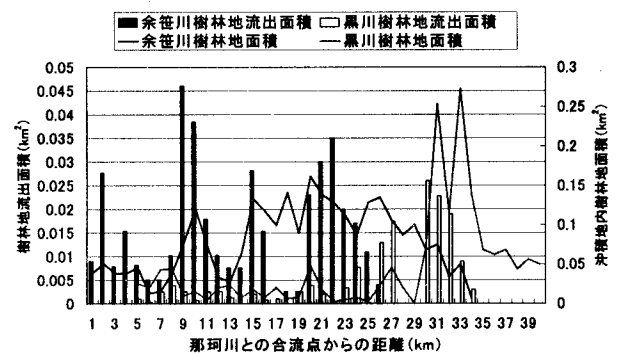


図-10 余笹川と黒川の森林地流出面積

と考えられる。その結果、今回の洪水でも、あまり侵食を受けなかったようである。沖積地境界付近において道路やそれを保護するための護岸が存在している場合には、それが耐侵食性を高めているようである。

4. 余笹川の区間生産土砂量

(1) 区間生産土砂量と侵食幅

洪水後の横断面図と洪水前後の航空写真や地形図、現地調査等により洪水前の横断面図を推定した。比高は地形図より全区間2mとし、洪水後の横断面図と洪水前の横断面図を比較して今回の洪水により生じた生産土砂測定区間の生産土砂を測定した。生産土砂量の測定区間は那珂川との合流地点から3.9~10.8km, 12.2~15.7kmの2区間で合計10.4kmである。生産土砂量は洪水前の流路の左・右岸ど

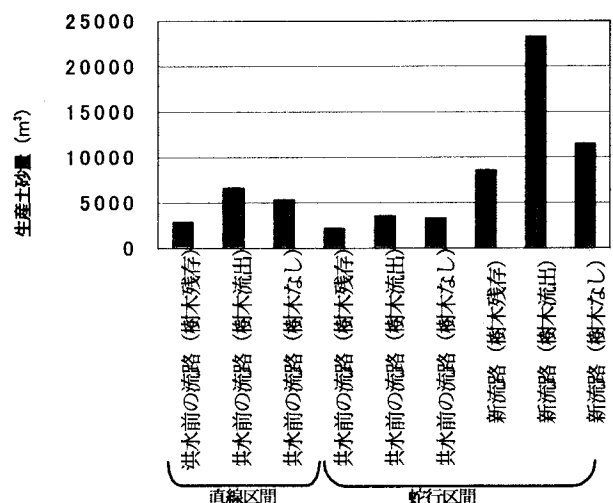


図-11 各条件による100m当たりの生産土砂量

ちらを侵食したかを区別し、新流路が形成されている場合でも左・右岸どちらに形成されたかを区別して測定した。

また縦断的に河道を蛇行区間と直線区間に区分して測定した(図-8)。侵食幅に関しても同様に測定した(図-9)。蛇行区間の蛇行特性を表-1に示す。蛇行部と直線部では蛇行部での生産土砂量が多く、蛇行部では左岸・右岸どちらか一方が極端に侵食される傾向がある。蛇行部で生産土砂量が多いのは蛇行前の直線区間において流水の直進性が強まるということが考えられる。また、蛇行部において新流路の形成が多くみられる。蛇行部での生産土砂量の大部分が新流路の形成により生じたものである。新流路で大量の土砂が侵食された原因としては洪水前の流路ではある程度アーマー化が進んでいるため侵食が生じにくい、今回の洪水で形成された新流路ではこれまで侵食されていないことから侵食されやすい火山灰性の堆積砂を多く含んでおり、アーマー化が完全に進行するまで大量の土砂を侵食したと考えられる。蛇行部において新流路の形成により生じた生産土砂量を除けば直線部と蛇行部での生産土砂量の数値の相違はそれほど顕著ではない。

(2) 樹木の存在と生産土砂量

図-10は余笹川と黒川において洪水前に沖積地内に存在した樹林地の面積と洪水によって流失した樹林地の面積を示した図である。流出した樹林地面積は余笹川で0.41km²、黒川で0.15km²であった。樹林地の流失面積は余笹川と黒川共に上流部で広い傾向がある。これは河道が山地部を流れており河道沿いに樹木が多く存在しているためである。中・下流部では樹木が河道沿いに点在しており樹林地が河道沿いに多く見られる地点に限り樹林地の流失面積が広い傾向がある。図-11は樹木が存在したかどうか、存在した場合は洪水で流出したかどうかを区分して河道長100m当たりの生産土砂量を示したものである。100m当たりの生産土砂量は蛇行区間で新流路が形成された地点で多く、蛇行区間の洪水前の流路側で生産土砂量が少ない傾向がある。蛇行区間では洪水時に流水の大部分が新流路の形成されている地点を流れていたため蛇行区間の洪水前の流路側ではあまり侵食を受けなかったと考えられる。樹木の存在による生産土砂量の相違は1)洪水前に樹木が存在していたが今回の洪水で残存した、2)もともと樹木が存在しない、3)洪水前に樹木が存在したが今回の洪水で流出した、の順に生産土砂量が少ない。このことから樹木が存在すれば生産土砂量を抑制することができるが、流木化する際に大量の土砂を流出するため、いざ樹木が流出してしまった場合その生産土砂量は樹木が存在しない場合よりも多くなるようである。

5. 側岸の粒度分布と掃流力

写真-2は写真-1の測量地点②の左岸部での侵食状況である。今回の洪水で侵食を逃れた側岸部の断面は表層部に見られるような主として細砂が見られる層と主として砂と礫が見られる層が交互に堆積していることが多い。

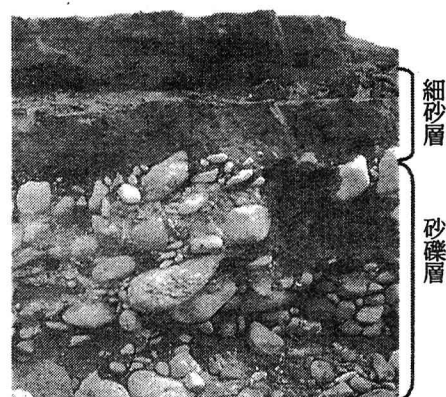


写真-2 侵食された側岸部の状況

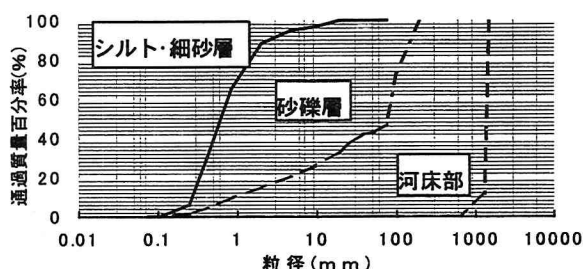


図-12 側岸部の土砂の粒度分布

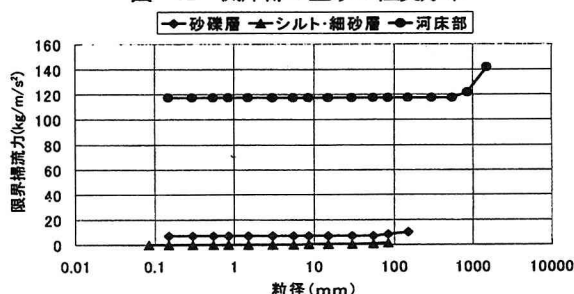


図-13 土砂の限界掃流力(河床部, Egiazaroffの式)

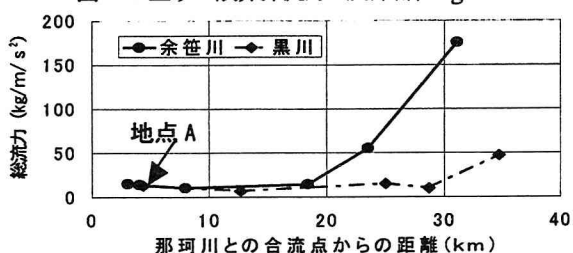


図-14 余笹川と黒川の掃流力

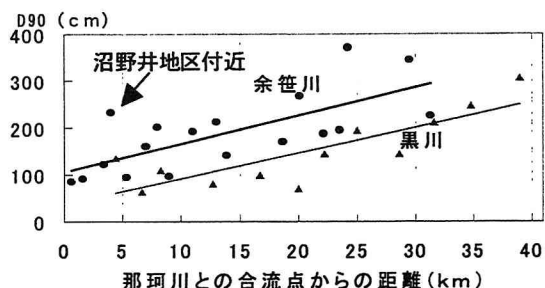


図-15 余笹川と黒川のD90の縦断変化

(前者を細砂層、後者を砂礫層と呼ぶことにする。)余笹川と黒川の他の地点でも同様な粒度層構成が見られるこ

とが多い。図-12は写真-2で示した側岸部の細砂層の土砂、砂礫層の土砂、洪水後の河床部の土砂の粒度分布を測定した例である。河床部では粗粒化が容易に進みペー
ブメントが形成されているため大径の玉石が多く見られる。これらの3種類の土砂が河床に存在するときの粒径
別限界掃流力をEgiazaroffの式を用いて計算した(図-7)。計算は芦田・道上⁶⁾と同様にEgiazaroffの式を $d_i/d_m < 0.4$ で $\tau_{ci}/\tau_{cm}=0.85$ に修正し、 d_m に対応する限界掃流力は $d_i/d_m=1$ として求めた。細砂層、砂礫層の限界掃流力は地点Aの掃流力(14kg/m²s²、図-15)より小さく、これらの土砂は河床上を容易に移動していたことがわかる。それに対し洪水後の河床部の限界掃流力は120kg/m²s²と大きく洪水後も河床上に残存した。また、地点A付近に見られる粒径2.5m(図-14)というような大径の礫は限界掃流力が大きいことから、今回の洪水で流されてきたのではなく、もともとこの地点に存在していたようである。

粘土・コロイド分を多量に含む粒径範囲の河床材料は粒子間の結合力によって高い粘着性を示す。この一つの原因としてはシルトや粘土は粒子が比較的複雑な形をしているため連結すると水分の影響で粘着性が減少しにくいということが考えられる。しかし今回の洪水のあった余笹川の土砂は比較的粒子の小さなものでも細砂ぐらいのものであり、それよりも小さなシルトや粘土はほとんどみられなかった。砂などの土砂の粒子は丸みを帯びており、そのため連結がもろく水分を含むと容易に侵食されやすいということが考えられる。

6. 結論

横侵食性の顕著な河道である余笹川での現地調査・資料調査の主要な結果は以下のようである。

- 1) 今回の洪水流により侵食を受けた河道の横侵食幅は生産土砂量の測定区間の平均が62m、最大値は蛇行部(赤沼地区付近)で149mというようなスケールであった。
- 2) 今回の洪水流による生産土砂量は那珂川との合流点から3.9~10.8km、12.2~15.7kmの2区間合計10.4kmで75万m³、長さ方向1m当たり区間平均72m³であった。
- 3) 蛇行部と直線部では蛇行部の方が生産土砂量が多い。これは蛇行部において新流路の形成が顕著であるためである。新流路での生産土砂量を除けば蛇行部・直線部での生産土砂量は1m当たり50m³程度であり数値の相違は顕著ではない。
- 4) 生産土砂量が少ない地点は樹木が洪水後も残存している地点が多い。生産土砂量が多いのは洪水時に樹木が流出しているような地点であり、もともと樹木が存在していない地点よりも生産土砂量は多くなる傾向がある。このことから流木化するときには大量の土砂を流出する危険性が高いようである。
- 5) 蛇行部において新流路が形成されているような地点で

は洪水時の流水の大部分が新流路側を流れるためか、洪水前の流路側での被害が小さい。

6) 新流路の形成は蛇行の平面形状の効果が大きく、特に沖積地と山地部との境界などでは、新流路は侵食されやすい沖積地側に形成される傾向がある。耐侵食性が強い原因として境界付近に岩や深根系の樹木あるいは護岸等の存在が挙げられる。また、沖積地境界付近では道路やそれを保護するための護岸が存在しそれが耐侵食性を上昇させているようである。これは被災している場合でもある程度の拡幅時間の遅れが生じている。

8) 新流路で生産土砂量が多い原因としては侵食されやすい火山灰性の堆積砂を多く含んでいるためペーブメント(アーマー化)が完全に進行するまで大量の土砂を侵食するためであると考えられる。

7. おわりに

本研究では、余笹川での横侵食の実態について調べた結果、低頻度大洪水による横侵食性の顕著な河道の形成過程の推定および新流路・横侵食の現象の実態、ならびに2粒径河道の特性とその原因について考察した。今後、土砂に粘着性を持たせた混合砂礫の横侵食実験を行い横侵食現象をより深く解明し、これらをもとにモデル化を行い、数値解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 須賀堯三・池田裕一・伊藤和典：余笹川の洪水災害、1998年南東北・北関東の集中豪雨に関する調査研究、平成10年度科学研究費補助金研究成果報告書、pp.53~69、1999。
- 2) 伊藤和典・須賀堯三・茂木信祥・池田裕一、平成10年8月末の那須出水による余笹川の流路変化の特性、水工学論文集、第44巻、pp.407~412、2000。
- 3) 伊藤和典・須賀堯三・池田裕一、横侵食性の顕著な河川に関する現地調査、第27回関東支部技術研究発表講演概要集、2000。
- 4) 茂木信祥・須賀堯三・伊藤和典、余笹川における流木生産について、第18回日本自然災害学会講演概要集、pp.161~162、1999。
- 5) 中川 一・高橋 保・里深好文、1998年洪水による那珂川水系余笹川の河道変動について、水工学論文集、第44巻、pp.395~400、2000。
- 6) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、pp.59~69、1972。

謝辞：本研究を遂行するにあたり文部省科研(平成11年度代表(真野教授)と河川整備基金(科研代表、須賀)の研究助成を受けた。また、災害後の空中写真、横断面図を入手する際に栃木県の便宜を受けた。ここに記して感謝する次第である。

(2000.10.2 受付)