

# 河川が形成した谷底低地の微地形と その河川地形学的意味に関する考察

STUDY ON THE MICROTOPOGRAPHY OF VALLEY PLAIN IN  
THE RIVER AND ITS FLUVIAL GEOMORPHOLOGICAL MEANINGS.

涌井 正樹<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>・佐藤 豊<sup>3</sup>・江川 千洋<sup>3</sup>・味方 圭哉<sup>3</sup>  
Masaki WAKUI, Shoji FUKUOKA, Yutaka SATOH, Chihiro EGAWA and Keiya MIKATA

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社キタック (〒950-0965 新潟県新潟市中央区新光町10番地2)

<sup>2</sup>フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>3</sup>非会員 株式会社キタック (〒950-0965 新潟県新潟市中央区新光町10番地2)

The estimation of possible maximum flood discharge due to climate change is an important issue in order to examine measures for the disaster prevention and reduction in the river basin. In general, the extremal discharge is estimated by the meteorological approach. Here, the other approach is attempted to investigate geological and geomorphological traces of the past extremal floods left in valley plains.

In this study, we focused on the Yosasa River of Tochigi Prefecture where various studies and analysis has been carried out since the large flooding in 1998, then we carried out the microtopography investigation left at valley bottom. Therefore, we showed that the extremal discharge is estimated by steps and soil structures in the valley bottom.

**Key Words :** valley plain , microtopography , step, Yosasa River, extremal discharge,

## 1. 序論

沖積地河川の安定な河道断面形状は、河道形成流量、河道勾配、河床材料、及び地形・地質の外的因子の作用により形成されることを福岡は示している<sup>1)</sup>。

近年、谷底低地(谷底平野)において谷底幅一杯に流れる大規模な洪水被害が発生している。このような谷底幅一杯に流れる洪水は、現在の谷底低地を形成するまでに幾度となく発生し、堆積・侵食作用を重ねてきている。谷底低地の中でも侵食が卓越している谷底侵食低地の場合、大規模洪水時であっても谷底内を溢れることなく流下し、その掃流力に見合った侵食により谷底低地を形成する。したがって、谷底侵食低地に刻まれた地形には、過去の大規模洪水時の痕跡が残されている可能性がある。

本研究は、形成年代が2万年以降の比較的新しい谷底侵食低地を流れる栃木県余笹川(図-1参照)において、大規模洪水時の流れと侵食地形の関係を調べながら河川地形の成り立ちを明らかにしようとするものである。

余笹川では平成10年に大規模洪水が発生し、様々な調

査・研究が行われている。坂口<sup>2)</sup>らは谷底低地を流れる河川においてピーク流量時の流況を平面二次元洪水流解析により再現できることを示し、99%流量流下時の水面幅が河道形成流量の河幅と考えた場合に福岡の式の上限度式よりも大きな値を示し、これが極値的流量に関係することを報告している(図-2参照)。本研究では、この坂口らの研究結果に着目し、既往の災害調査資料や文献の整理、空中写真判読、現地調査を行い、余笹川の谷底侵食低地の地形・地質的特徴を把握し、99%流量流下時の水面幅の位置が谷底低地内の段差の位置と概ね一致すること、その段差が過去の洪水の極値的流量により形成された可能性があり、その規模は平成10年洪水ピーク流量の1.3倍以上~2.2倍程度に相当することを示した。

## 2. 対象河川及び対象区間の選定

本研究は、谷底侵食低地を流れる河川の侵食作用により形成された河道の段差に着目するものである。一般に河川地形学における段差の形成要因には、地殻変動(隆

「カラーページを希望」

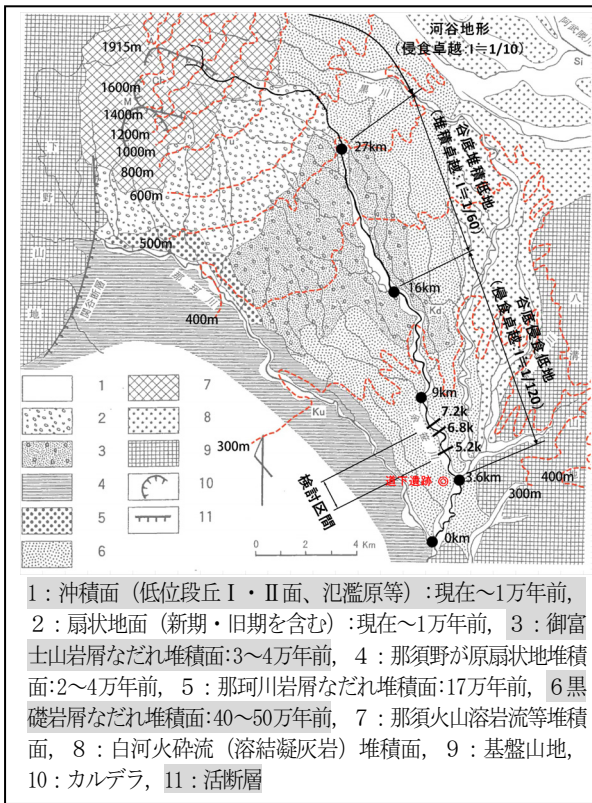


図-1 余笹川流域の地形概念図<sup>3)</sup>の文前コ加工

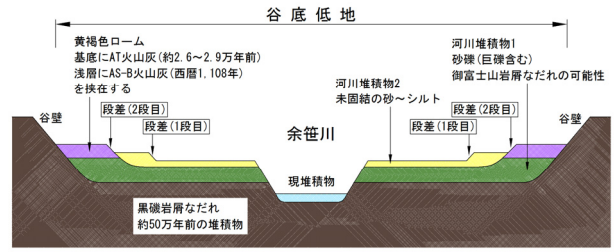


図-3 余笹川谷底低地の模式断面図

の影響が小さく、過去の大規模洪水のデータが残されている栃木県の余笹川を研究対象として選定した。

余笹川は、那須岳(標高1,915m)にその源を発し、南東方向に流下する流域面積343.5km<sup>2</sup>、幹線流路長37.5km、平均勾配1/32の河川である。余笹川が明瞭な谷底低地内を流下するのは0.0km~16.0km間であるが、本研究では黒川との合流点より上流かつ、流路の屈曲度が比較的小さい4.0km~9.0km間を対象区間とした。

本区間の基盤地質は、40~50万年前に堆積した那須岳起源の黒礫岩屑なだれ堆積物である<sup>3)</sup>。那須岳は近年も噴火を繰り返している活火山であり、谷底低地形成後も度々、火山噴出物の流下や堆積が繰り返して生じてきた。近年では、3~4万年前に発生した御富士山岩屑なだれが余笹川の12km付近まで流下し堆積している<sup>3)</sup>。対象区間の谷底低地における地質構成は、丹羽・関口の成果<sup>3)</sup>、橋梁のボーリング調査結果<sup>4)</sup>、図-1の道下遺跡のトレンチ調査結果<sup>5)</sup>、本研究での検土杖調査結果から、図-3のような断面形になっていると考えられる。道下遺跡調査報告書によれば、黄褐色ロームの基底には2.6~2.9万年前のAT始良火山灰が挟在し、表層には西暦1,108年(約900年前)のAS-B浅間山天仁火山灰が挟在していることが報告されている。以上より、谷底低地に残された洪水の痕跡は2.6万年前まで遡ることができると考えられる。

本研究では、谷底低地に形成された段差を洪水時の侵食痕として捉えているが、まずは断層もしくは海水準低下によって形成された段丘の可能性について議論しておく。余笹川最上流の那須火山体周辺には、関谷断層、剣桂断層、那須湯本北東断層の存在が知られている<sup>6)</sup>。ただし、調査範囲より下流の余笹川及び、その本川である那珂川流域において活断層の存在は報告されていない<sup>7)</sup>。東北日本は東-西からのプレートの圧縮により、内陸部は隆起し沿岸部は沈降し続けているとされている。このような地殻変動の影響を活断層の有無のみによって評価することはできないが、本研究では活断層の有無から、余笹川の研究対象区間において地殻変動の影響は軽微であると考えた。一方、谷底低地の段差は黄褐色ロームもしくは未固結の砂~シルト(N値<4)により形成され、その形成時期は前者が2.6万年前以降、後者が現世(完新世)と考えられる。最終氷期の海水準変動は12万年前に低下し始め、短周期の海水準の昇降を繰り返しながら1.8万年前に現在の海面-120mに達し、その後急速に上

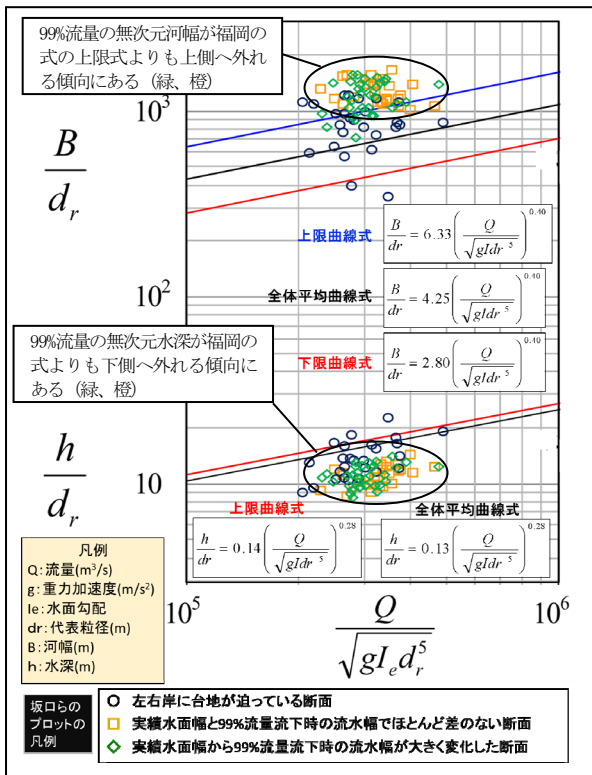


図-2 福岡の式を用いた余笹川での平成10年洪水ピーク流量に対する99%無次元流量と無次元水面幅の関係<sup>2)</sup>

起・沈降)、海水準変動(低下)、そして洪水時の侵食作用によるものがあり、前2者によって形成された段差は段丘崖とよばれている。本研究では段差の形成要因を洪水時の侵食作用に限定するため、地殻変動や海水準変動

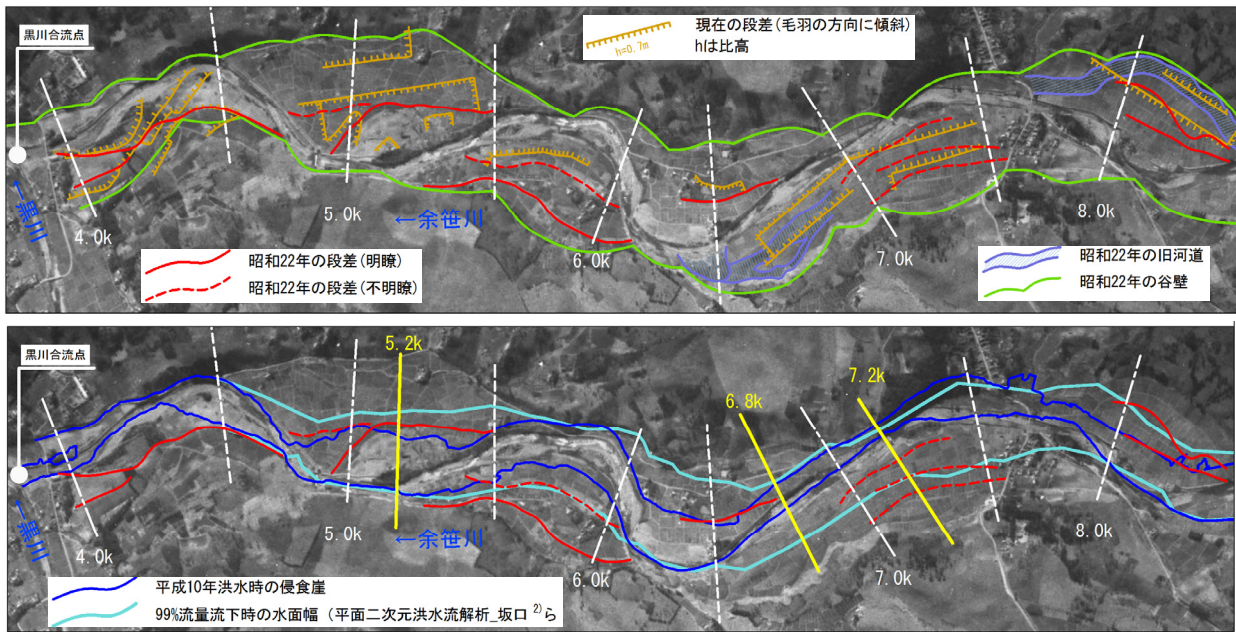


図-4 余笹川の4.0～8.0kにおける地形(上図；昭和22年空中写真判読結果と現在の段差、下図；谷底低地に刻まれた段差と平成10年洪水時の侵食崖、坂口らの平成10年洪水の解析水面幅の関係)

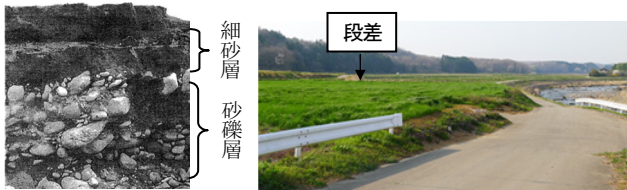


写真-1 平成10年洪水の侵食痕<sup>9)</sup>

写真-2 余笹川谷底低地に確認された段差

昇したとされている<sup>9)</sup>。つまり、海水準低下に伴い形成される段丘は12万年前～1.8万年前にかけて起きる現象であること、余笹川の研究対象区間は海岸線から約80kmの内陸に位置していることから、余笹川の研究対象区間において海水準低下による影響は軽微であると考えた。

本研究では、段差の形成機構に関して段丘の可能性を完全に排除できていない。しかし、水際に近い1段目の段差は以下の理由から、洪水の侵食作用により形成されたものであり、段丘ではないと判断した。

- 1) 1段目の段差が形成されている地質はN値4未満の軟弱層であり、現世(完新世)に堆積したものである。数万年～数10万年単位で起こる地殻変動や海水準変動の影響は無視できると考えられる。
- 2) 1段目の段差(2段目も同様)は蛇行河川のポイントバーに直線的に形成されているのに対し、谷壁(段丘崖)は100～500mの長さの円弧が組み合わさったような形状を示し形成機構が異なると考えられる(図-4)。
- 3) 平成10年洪水時の侵食痕と1段目の段差は、近い位置に形成されている場合が多い(図-4)。
- 4) 平成10年の洪水時には、側方侵食が卓越したという実績がある(写真-1参照)<sup>9)</sup>。

### 3. 検討方法

本研究は、平成10年洪水時(黒川合流点でのピーク流量 $1,740\text{m}^3/\text{s}$ )に残された側方侵食痕の持つ意味と現地調査で確認した谷底低地に刻まれている微地形(段差)の持つ意味を河川工学的見地から考察するものであり、①地形特性を把握するために、現在の微地形の計測、過去の空中写真判読、災害時の測量結果の整理<sup>10)</sup>などを行い、②地質特性を把握するために、既往の地質図や地質調査結果の整理、表層土質構成を把握するための検土杖による調査などを行い、③洪水時の流況特性を把握するために、坂口らが行った平面二次元洪水流解析の水利諸元を整理し、これら①～③を包括的に考察しながら研究を進めた。

### 4. 検討結果

#### (1) 地形特性

写真-2は、谷底低地に認められる段差である。高低差は0.3～1.2mであり、一見、圃場整備により形成された可能性も考えられる。この段差が圃場整備が行われる前から形成されていたことを確認するために昭和22年米軍撮影の空中写真を判読し、段差位置の抽出と重ね合わせを行った。結果は図-4に示す通り、細かい箇所では異なるものの段差位置は概ね現在の段差位置と一致することから、圃場整備以前から存在する段差であることが分かった。

平成10年洪水の特徴は、側方侵食により流路幅が3～5倍に拡大したことが挙げられる。図-4は、流路幅が拡大した左右岸の侵食痕の位置を平面図に示したものである。

## 「カラーページを希望」

左右岸の侵食痕の幅を侵食幅と定義する。侵食幅は場所により大きく異なるが、昭和22年の段差位置や現在の段差位置と比較すると、蛇行する流路の内岸側に形成されていることが分かった。これは、大規模洪水時に湾曲部をショートカットする流れにより形成された痕跡の可能性があると考えた。

### (2) 地質特性

段差の形成過程を把握する目的で、段差を挟んだ地質の連続性を確認するために検土杖を用いた表層1～2m(砂礫で貫入不能となる深さまで)の試料採取を行った。

段差の計測・調査は、谷底幅の広い箇所代表断面3測線(5.2k, 6.8k, 7.2k)で実施した(図-1, 図-4参照)。結果を図-5に示す。これらより以下のことが分かった。

- 1) すべての測線において段差は1～2段確認された。段差の高低差は0.3m～1.2mであり、現地では分かりにくい0.5m以下の段差と1m前後の明瞭な段差の2種類がある。
- 2) 1m前後の段差は、段差の上下で土質の連続性を確認できなかった(5.2k右岸1段目、7.2k左岸の2段目)。
- 3) 7.2k左岸の2段目段差の上面において黄褐色のロームが確認された。この黄褐色ロームの年代を特定することはできないが、2.6万年前～900年前の間に堆積したものであることは間違いないと考えられ<sup>5)</sup>、2段目段差はこのロームが堆積して以降の大規模出水で侵食された地形と判断することができる。

### (3) 水理諸元

坂口<sup>2)</sup>らは谷底低地を流れる河川の河道形成流量の河幅はピーク流量の99%流量流下時の水面幅であると考えた。99%流量時の水際の流速は1.0m/s前後、水深も1m前後であり、その位置は図-4に示す通り、今回確認した段差位置(2段ある場合は外側の段差)と概ね一致することを確認した。痕跡水位と概ね一致した坂口らの解析水位の水面勾配は、1/80～1/150であった。

## 5. 考察

### (1) 平成10年洪水時に残された側方侵食痕位置での侵食幅の持つ意味について

谷底低地を蛇行しながら1～2段の段差を有する余笹川は複断面蛇行流路と見なすことができ、4(1)で述べた侵食痕の特徴は、複断面河道内を低水路が蛇行する場合の大規模出水時の流れと同様のものとする。岡田ら<sup>11)</sup>は、複断面河道の蛇行度及び相対水深を変化させた実験を行い、低水路幅/蛇行帯幅<0.5、蛇行度<1.10の条件で相対水深 $D_f$ (高水敷水深/低水路全水深)が0.3以下の場合低水路の法線形による遠心力に起因する二次流の発達で低水路外岸側に主流線が発達し単断面的流れとなり、0.3以上となると低水路と高水敷の間の流れの

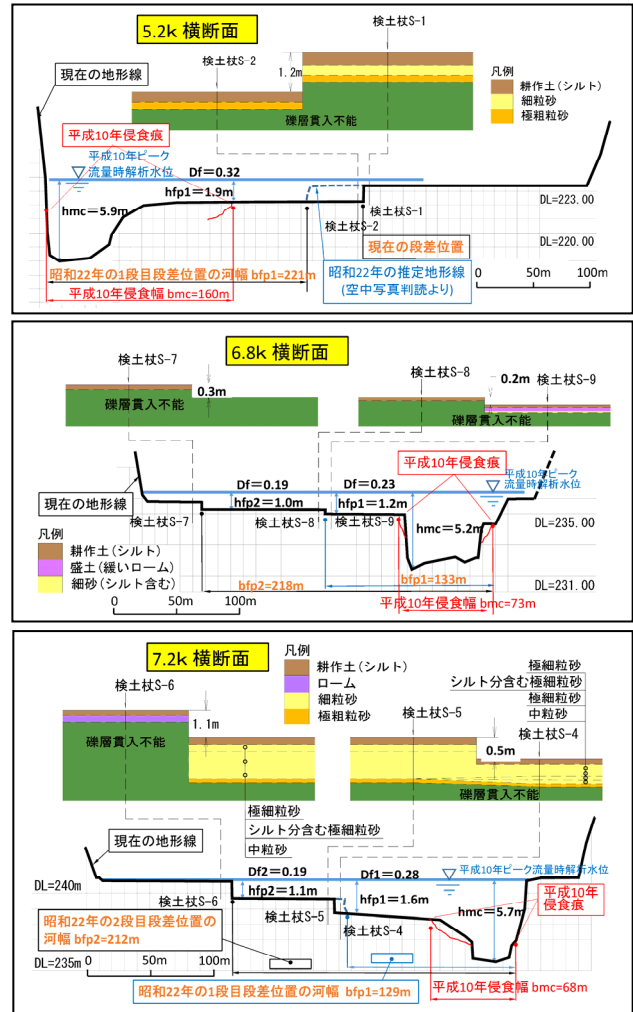


図-5 代表断面の段差の大きさ及び段差上下の土質構成

混合が大きくなり二次流構造の変化により低水路内岸側に主流線が移行する複断面的流れに変わることを報告している。

このとき、外岸側の谷壁は40～50万年前の良く締まった黒礫岩層などで構成され耐侵食性は高いため、外岸寄り流れが発達しても容易に侵食幅は広がらない。一方、内岸寄り流れが発達するとルーズな完新世堆積物を容易に侵食し、大幅に河岸が後退することとなる。

河床高と背後地盤高との比高差により相対水深は変化するが、図-5に示すように今回の3測線のうち、5.2kのみ $D_f$ が0.32と0.3を越え、内岸側の流れが卓越し侵食が拡大したと考えられる(表-2, 図-6参照)。6.8k, 7.2kは1断面、2段目の段差ともに $D_f$ の値が0.19～0.28であったため湾曲部外岸側の流れが発達する単断面的流れとなり内岸側の侵食が拡大しなかったものと考えられる。

前述のとおり、坂口らはピーク流量の99%流量の水面幅を福岡の式へ適用した場合、上限式よりも大きな値を示すことを報告しているが、ここでは側方侵食痕位置での侵食幅を河幅として福岡の式へ適用する。図-7に3測線の侵食幅をプロットした。これより、 $D_f$ の値が小さく

表-2 3測線の段差、河幅及び平成10年洪水時の水理に基づく単断面的流れ・複断面的流れの判定

距離標	平成10年 洪水流量 Q(m <sup>3</sup> /s)	水面 勾配 <sup>※1)</sup> Ie	流路高 zmc(m)	1段目 段差 zfp1(m)	2段目 段差 zfp2(m)	被災前 川幅 b(m)	侵食幅 bmc(m)	1段目 川幅 <sup>※2)</sup> bfp1(m)	2段目 川幅 bfp2(m)	谷底幅 B(m)	蛇行帯幅 Bm(m)	b/Bm
5.2k	1,740	0.007	3.3	1.2	---	49	160	221	---	470	460	0.11
6.8k	1,740	0.013	4.0	0.2	0.3	42	73	133	218	420	580	0.07
7.2k	1,740	0.011	4.3	0.5	1.1	40	68	139	212	310	580	0.07

距離標	低水路 水深 hmc(m)	1段目 水深 hfp1(m)	2段目 水深 hfp2(m)	水深比 D <sub>r</sub>		蛇行度 S	無次元 流量 (H10) Q/(gd <sup>3</sup> ) <sup>0.5</sup>	無次元 侵食幅 bmc/d	無次元 水深 <sup>※3)</sup> h/d	無次元 河幅 (1段目) bfp1/d	無次元 流量 (1段目) Q/(gd <sup>3</sup> ) <sup>0.5</sup>	1段目河 幅形成 流量 Qp(m <sup>3</sup> /s)
				hfp1/hmc	hfp2/hmc							
5.2k	5.9	1.9	---	0.322	---	1.03	371.375	800	23	1,105	8.3E+05	3,901
6.8k	5.2	1.2	1.0	0.231	0.192	1.16	277.911	365	32	---	---	---
7.2k	5.7	1.6	1.1	0.281	0.193	1.16	296.254	340	24	---	---	---

※1) Ie: 坂口らの平面二次元洪水解析結果の水面勾配<sup>2)</sup>  
 ※2) 5.2kの1段目川幅(bfp1=221m)は現在の幅(260m)ではなく、昭和22年当時の幅を空中写真より読み取り設定した  
 ※3) 無次元水深の水深 h は、侵食幅を用いて算出した(h=A/bmc)、A: 河積  
 ※4) s: 河床材料の水中比重(1.65)、g: 重力加速度(980cm/s<sup>2</sup>)、d: 河床材料代表粒径(d60=20cm)<sup>4)</sup>

$$Df1=hfp1/hmc(1段目)$$

$$Df2=hfp2/hmc(2段目)$$

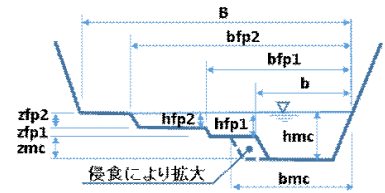


図-6 D<sub>f</sub> (表-2) 算定説明図

湾曲部の影響を強く受け単断面的流れとなり侵食幅があまり広がらなかった6.8kや7.2kの点は下限式の近似曲線からも下側へ外れる傾向となり、D<sub>r</sub>の値が0.3より大きく直線的な流れで複断面的流れとなった5.2kについては概ね福岡の式の平均式に近いところにプロットされた。このことは、谷底低地においての福岡の式の適用性を示唆するものと考えられる。

(2) 谷底低地に刻まれた段差の持つ意味について

今回の調査により、谷底低地の横断方向に1m程度の段差があることが分かった。2. でも述べた通り、水際に近い1段目の段差は、段丘崖ではなく大規模洪水による河川の侵食作用により形成された侵食崖であると判断した。人工改変の少ない昭和22年米軍撮影の空中写真判読で確認したこの段差は、平成10年洪水の侵食痕よりも少し山側に位置することから(図-4参照)、前述の福岡の式の適合性が良い5.2kのような条件下において、かつ、段差が1段しかない箇所では、谷底低地形成過程における極値的流量の痕跡を表している可能性があると考えた。

図-7で5.2kをプロットした点の無次元河幅と無次元流量の関係から福岡の式の曲線式を設定し、その曲線上で1段目段差の無次元河幅を代入し無次元流量を求める。結果は、表-2、図-7に示すようにQ<sub>p</sub>=3,900m<sup>3</sup>/sと平成10年洪水の約2.2倍の流量規模であることが分かった。

一方、侵食幅を用いた無次元河幅での福岡の式への適合性が低かった6.8k、7.2kは、湾曲度が大きく相対水深比が0.3以下の単断面的流れが卓越したことで侵食幅が広がらなかったことがその理由である。しかし、この断面には段差が2段確認されている。これら段差の形成過程は、段差の平面形状が湾曲部に沿った法線形であることから(図-4参照)、湾曲部内岸側の流速が速くなる条件下で形成されたものと考えられる。その条件は、相対水深比が0.3以上の複断面的流れによるものと考えられる。明瞭な段差が確認された7.2kの2段目段差を例とすると、平成10年洪水時の相対水深比は、D<sub>r</sub>=0.19である(段差位置の水深1.1m/低水路水深5.7m)。D<sub>r</sub>>0.3と

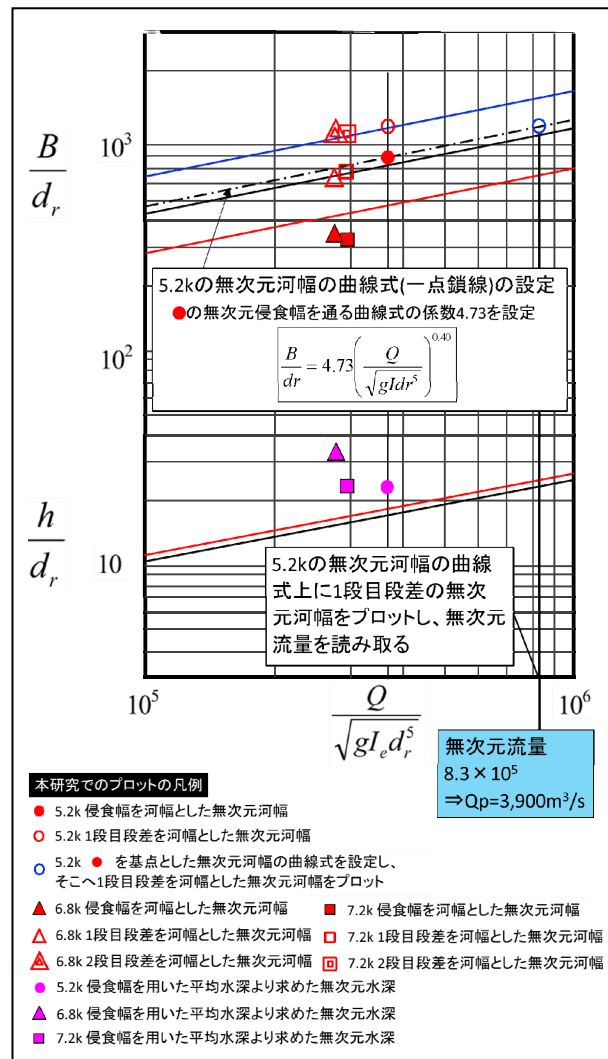


図-7 福岡の式を用いた極値的流量の推定

なるには、段差位置での水深が2.0m以上でなければならず、平成10年洪水時よりも水位が0.9m高い状態である。その流量は水深比より平成10年洪水の約1.3倍({6.6/5.7}<sup>5/3</sup>)の2,300m<sup>3</sup>/s程度以上であったと推察される。1段目段差は、大規模洪水の侵食作用により形成されたものと考えたことは前述の通りであるが、2段目

段差については段丘崖の可能性を否定できていない。しかし、2段目段差の法線形が現在の流路法線と同じであること、2段目段差の河幅と5.2kの1段目段差の河幅が概ね等しいことから、1段目段差の形成過程と同様に $Q=2,300\text{m}^3/\text{s}$ 以上の大規模洪水時の侵食作用で出来上がった可能性は高いと考える。

また、図-7において、6.8k、7.2kの2段目段差位置の無次元河幅と5.2kの1段目段差位置の無次元河幅が、ほぼ福岡の式の上限式に乗っていることは興味深く、2段目段差の河幅の意味（河幅形成過程）については今後の課題である。また、高低差1m程度で上下の土質が不連続な箇所での段差は大規模洪水時の侵食作用により形成された痕跡の可能性があると考えられるが、高低差0.5m程度の小規模な段差の意味については今後の課題である。

坂口らは図-2において、99%流量流下時の水面幅が河道形成流量の河幅と考えた場合に福岡の式の上限式よりも大きな値を示すと報告している。本研究において坂口らの99%流量時の水面水際線が概ね高位の段差位置と一致することが分かった。その中で、 $D_f > 0.3$ の複断面的流れ（湾曲部をショートカットする流れ）となる箇所では、河幅を侵食幅で無次元化することにより、福岡の式の平均式に近似することが分かった。

以上、谷底低地に刻まれた段差地形により、複断面的な流れの場合、単断面的な流れの場合のそれぞれで河道形成流量の試算を行った結果、過去には平成10年洪水ピーク流量に対し1.3倍以上～2.2倍程度の極値的流量が谷底低地（谷底平野）に流れた可能性を示すことができた。

## 6. 結論

- 1) 古い地図や空中写真を活用しながら、微地形調査や検土杖による地質調査など簡易な道具で現地を詳細に調査することにより、河川地形の成り立ちや極値的流量を知ることの可能性を示した。
- 2) 海水準変動や地殻変動の影響が少ない谷底侵食低地に形成されている段差の位置を人工改変の影響が少ない昭和22年米軍空中写真から確認し、その土質構成を検土杖などにより調査する。土質が不連続な状態で高低差が1m程度の場合、大規模洪水時の侵食作用により形成された段差である可能性がある。
- 3) 坂口らの99%流量時の水面水際線は、本研究で確認した高位の段差位置と概ね一致する。その中で、 $D_f > 0.3$ の複断面的流れ（湾曲部をショートカットする流れ）となる箇所では、河幅を侵食幅で無次元化することにより、福岡の式の平均式に近似することが分かった。
- 4) 谷底低地を流れる余笹川の水利を単断面的流れと複断面的流れに分けて考えることにより、それぞれの場で谷底低地を形成した極値的流量の試算を行った。

その結果、余笹川の極値的流量は平成10年洪水の1.3倍以上～2.2倍規模と推察した。

## 7. あとがき

今後予想される気候変動等による想定最大洪水流量の推定は、河川流域の減災対策を検討するうえで重要な課題である。過去に生じた地域ごとの最大雨量データを用いた分析や、大掛かりな地球規模の気象力学研究から想定最大洪水流量の評価が試みられている。しかし、今後の気象がどのように変化するかについては、不確かな部分も多いために、気象力学的方法だけの見積もりでは不十分であり、地上で得られる歴史的な地形・地質データに基づく異なる視点での見積もりも必要であると考えられる。

本研究では、大規模な地殻変動を経験していない谷底平野を流れる河川を対象に河川の微地形の調査結果から、谷底平野を創った過去の大洪水の痕跡を調べ、極値的流量を推定している。今後、他の谷底平野を流れる河川でも同様の検討を行うことにより極値的流量の算定精度を高めていく予定である。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二：治水と環境の調和した治水適応策としての河幅、断面形の検討方法。河川技術シンポジウム、第16巻、pp.5～10、2010。
- 2) 坂口達哉、久保雄生、福岡捷二：谷底平野を流下する河川の大洪水時の河幅の研究、水工学論文集、第57巻、2013。
- 3) 丹羽俊二、関口辰夫：那珂川上流余笹川の水害、国土地理院技術資料D・5-No.17、pp.87～103、1999。
- 4) (財)河川環境管理財団河川環境総合研究所：大規模災害の復旧工事後の河道・環境特性の変化—余笹川の事例—、河川環境総合研究所資料第27号、2009。
- 5) 道下遺跡：一般国道294号線稲沢工区改良工事に伴う発掘調査、1997、栃木県教育委員会
- 6) 山元孝広、伴雅雄：那須火山地質図、(独)産業技術総合研究所、1997。
- 7) 中田高、今泉俊文：活断層詳細デジタルマップ、(独)産業技術総合研究所、2002。
- 8) 田辺晋、石原武志、小松原琢：沖積層の基底にみられる起伏地形：その成因の予察的解釈、地質調査研究報告、第65巻、第3/4号、pp.45～55、2014。
- 9) 伊藤和典、須賀堯三、池田裕一：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、水工学論文集、第45巻、pp.781～786、2001。
- 10) 栃木県：一級河川那珂川水系余笹川災害復旧事業計画書（一定災）、1999。
- 11) 岡田将治、福岡捷二：複断面河道における洪水流特性と流砂量・河床変動の研究、土木学会論文集、No.754/II-66、pp.19～31、2004。

(2015.4.3受付)