

5.3 自然環境

5.3.1 気候

余笹川流域は、夏に降雨が集中する太平洋側気候を示し、夏と冬の温度差が大きい内陸性の特徴を持っており、那須高原の年間の平均気温は約9℃、降雨量は年間約2,000mmで日本の平均よりも幾分多い温帯湿潤気候に属する。

表 5-3-1 余笹川流域周辺の年間降水量及び年平均気温の経年変化（気象庁過去のデータより）

| 観測所名 | 標高 (m) | 1986～2016年の年間降水量(単位: ×100 mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 平均 年降水 量 (mm) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| | | 1 9 8 6 | 1 9 8 7 | 1 9 8 8 | 1 9 9 0 | 1 9 9 1 | 1 9 9 2 | 1 9 9 3 | 1 9 9 4 | 1 9 9 5 | 1 9 9 6 | 1 9 9 7 | 1 9 9 8 | 1 9 9 9 | 2 0 0 0 | 2 0 0 1 | 2 0 0 2 | 2 0 0 3 | 2 0 0 4 | 2 0 0 5 | 2 0 0 6 | | | | | | | | | | | | |
| 那須高原 | 749 | 16 | 16 | 21 | 21 | 22 | 24 | 15 | 22 | 18 | 18 | 13 | 18 | 30 | 23 | 26 | 17 | 21 | 18 | 22 | 17 | 23 | 20 | 21 | 20 | 21 | 21 | 22 | 20 | 23 | 18 | 18 | 2,016 |
| 黒磯 | 343 | 14 | 13 | 13 | 17 | 16 | 19 | 12 | 15 | 14 | 14 | 10 | 16 | 21 | 17 | 20 | 14 | 18 | 16 | 18 | 12 | 17 | 15 | 18 | 17 | 20 | 17 | 17 | 15 | 15 | 13 | 13 | 1,568 |
| 宇都宮 | 119 | 14 | 13 | 17 | 20 | 16 | 18 | 14 | 15 | 12 | 14 | 11 | 16 | 19 | 14 | 16 | 15 | 16 | 15 | 17 | 13 | 17 | 13 | 16 | 14 | 17 | 16 | 17 | 15 | 18 | 17 | 16 | 1,552 |

| 観測所名 | 標高 (m) | 1986～2016年の年平均気温(単位: °C) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 年平均 気温 (°C) | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|
| | | 1 9 8 6 | 1 9 8 7 | 1 9 8 8 | 1 9 8 9 | 1 9 9 0 | 1 9 9 1 | 1 9 9 2 | 1 9 9 3 | 1 9 9 4 | 1 9 9 5 | 1 9 9 6 | 1 9 9 7 | 1 9 9 8 | 1 9 9 9 | 2 0 0 0 | 2 0 0 1 | 2 0 0 2 | 2 0 0 3 | 2 0 0 4 | 2 0 0 5 | | 2 0 0 6 | | | | | | | | | | | |
| 那須高原 | 749 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9 | 10 | 9 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 | 9.4 | |
| 黒磯 | 343 | 11 | 12 | 10 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 12 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 11.9 | |
| 宇都宮 | 119 | 13 | 14 | 13 | 14 | 15 | 14 | 14 | 13 | 15 | 14 | 13 | 14 | 14 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 15 | 14 | 14 | 15 | 14 | 15 | 14 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 15 | 15 | 14.1 |

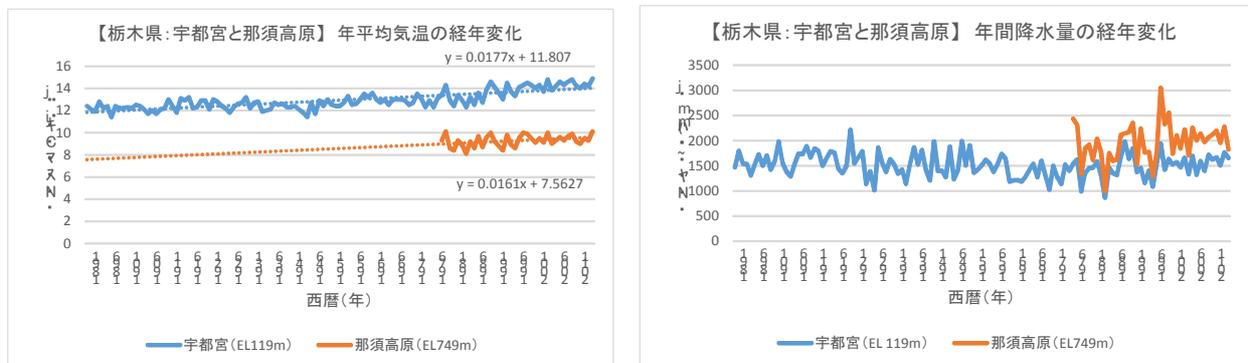


図 5-3-1 宇都宮、那須高原の年平均気温と年間降水量の経年変化（1891～2015）：気象庁

図 5-3-1 より、最近約 100 年間の平均気温は上昇傾向にあり、このデータからも温暖化が進行していることが分かる。年間降水量は、宇都宮ではあまり大きな変化はないものの、標高が高い那須高原の変動は大きい(1,000mm～3,000mm)。

5.3.2 植生

那珂川上流域は日光国立公園、東部地域が八溝県立自然公園に指定されているなど、流域全体が優れた自然環境を有している。上流域は、那須連山が位置し清冽な水と豊かな自然に包まれた麗美な景観を呈し、植生は自然

林が存在し、ミズナラ等の落葉広葉樹、亜高山帯性の植生域となっている。

中下流域は、自然と田園、街並みが相まって良好な景観を呈している状況で、植生は二次林や人工林が増える傾向にあるものの、ヤブツバキ等の常緑広葉樹が主体である。また、河川水際にはヨシなどの草木類、堤防や堤内地にはタケやオニグルミ、クリ等の樹木が生育している。

5.3.3 生物

昆虫類では貴重種のハッチョウトンボやムカシトンボ等が確認されている。また、河川空間の利用は、豊かな自然空間を求めた散策や溪流釣り等に多くの人々が親しみ利用している。

魚類はアユをはじめコイ、ウグイ、ウナギ等多くの種類の魚が生息している。河川空間の利用は、市街地に隣接する広い高水敷を利用した河川公園等が多く、那珂川の「那珂川河畔公園」や「なかがわ水遊園」、余笹川の「ふれあい公園」があり、三蔵川沿川では観光拠点の開発の一貫として河岸と一体となった「道の駅」などの整備がされ、スポーツやイベント、レクリエーション等人々の憩いの場として広く利用されている。

また本川那珂川、余笹川、黒川はアユ釣りのメッカとして多くの釣り人に利用されている。このようなことに加え、近年のエコロジーブーム、生活のゆとりを求める風潮から河川空間の有効利用や本来持っていた河川空間の再生が重要な課題であり、さらに豊かな自然環境を活かしつつ地域計画と連携した観光拠点づくりや河川を通じた地域住民の憩いの場所となる河川が望まれている。

5.3.4 水質

水質については、那珂川の恒明橋、余笹川の川田橋、黒川の新田橋が環境基準点となっており、恒明橋はAA類型 (BOD1.0mg/ℓ以下) に指定され、過去10ヶ年の75%値は0.5mg/ℓから0.9mg/ℓで推移している。その他の基準点はA類型 (BOD2.0mg/ℓ以下) に指定され、過去10ヶ年の75%値は0.5mg/ℓから2.1mg/ℓで推移しており、ほぼ環境基準を満足している。しかし、大腸菌群が環境基準を超えており水辺空間利用にあたっては今後の課題となっている。

5.4 社会環境

余笹川流域は、栃木県北部に位置する那須町、那須塩原市、大田原町、福島県南部に位置する白河市、西郷村からなるが、大部分は那須町が占めている。那須町の人口は2,000年(平成12)で約27千人、ここ数年横ばいである。

余笹川、黒川の土地利用基本計画(栃木県)では、上流部が森林地域に、中・下流部の谷底低地は農業地域に指定されている。また、那須都市計画総括図によると、余笹川・黒川の周辺丘陵は下流部の一部を除き、都市計画区域に指定されている。

中流域に東北新幹線、JR東北線、東北自動車道、国道4号の主要交通幹線などの主要交通網が余笹川を横断し、上流域の那須高原には別荘地等のリゾート地が多く開発されている。

余笹川流域の谷底部には水田が分布しており、多数の取水堰を設け、用水が反復利用されている。農業用取水堰は余笹川で10堰、四ツ川に3堰が存在する。

5.5 余笹川・黒川の河道特性

余笹川と黒川は河川の規模（流域面積）はほとんど同じであり，調査対象範囲においては，余笹川と黒川は標高 300 ～ 500 m の丘陵に囲まれた谷底平野を蛇行しながら大局的には南へ流下している．谷底平野の幅は 100 ～ 500 m（平均 300 m）で，下流ほど幅が広い．

谷底平野は，岩屑なだれ堆積物を開析し谷底幅が拡大した河谷地形である．ひとたび火山活動が活発になると火山砕屑物の噴出・堆積，山体崩壊による岩屑なだれにより谷は埋塞し，その後再び開析が始まる．火山に近い余笹川の方がこの影響は大きく，その特徴的地形を確認できる．

穿入蛇行谷で河谷が拡大した谷底侵食低地の特徴は，次の通りである．余笹川では，黒川との合流点から黒田原下流下川の下川橋に至る区間で氾濫原の幅が 200～400m と広く旧河道が発達する．下川橋より上流の那須町小羽入にかけて段丘面が広がるため 50～100m と狭くなるが，小羽入より上流では氾濫原の幅は 200～300m と再び広がる．一方，黒川では氾濫原の幅が 50m 程度の非常に狭い部分や 100～200m のやや広い部分とが交互に現れる．氾濫原の幅が 50～100m の狭い部分では曲流をなし，氾濫原の幅が広がるにつれて大きな蛇行ないし直線状の流路となる．

氾濫原の谷壁に沿って現在の流路は形成されている．広い氾濫原では対岸の谷壁に沿って旧河道の痕跡を確認することができる．余笹川の黒川合流点から那須町黒田原の東北新幹線橋に至る区間では，幅 400～500m の氾濫原の中に長さ 500～800m で幅 30～40m の旧河道が多数みられる．一方，黒川の旧河道は非常に少なく，余笹川に比べ幅，長さとも小規模である．

上野²⁾は，1998 年洪水後の近年の流路と過去の流路の重ね合わせを行い，流路の変遷を調べている．明治 42 年に作成された地図と最近作成された地図との比較から，河道の移動を調べた．図 5-5-1 の上側の 1/3 は平成 6 年発行，下側の 2/3 は平成 8 年発行の 5 万分の 1 の地図である．余笹川と黒川の合流点を基点として，河道に沿う距離標（km）を数値で示している．

図 5-5-1 の黒川において，約 86 年間に河道が 2.3 km 地点付近で 100 m 下流へ，3.2 km 地点付近で 30 m 東へ，5.0 km 地点付近で 30 m 東へ，5.5 km 地点付近で 30 m 西へ，7.4 km 地点付近で 100 m 下流へ移動し，上記の区間のその他の地点では河道の移動がほとんどないことがわかった．以上の実態から，この区間においては，蛇行河道を流下する洪水流が河道湾曲部の外岸側と河床を侵食することにより，蛇行河道が谷底平野内を徐々に下流あるいは横方向へと移動した．このような河道の移動に伴って，現況の谷底平野の形態が造りだされたと考えられる．

余笹川の流路は，図 5-1-2 に示すように那須岳を中心とする同心円状の等高線にほぼ直角になるように南南西方向に蛇行しながら流下している．一方，黒川は図 5-2-3 の地質図に示すように東側の溶結凝灰岩（白河デイサイト）に規制されほぼ直線的に南流しており，図 5-5-1 においても余笹川に比べて流路（太線）が直線的な区間が多くみられる．この結果，余笹川では概ね河流蛇行と河谷蛇行は概ね同じ波長で比較的規則的な蛇行形状であ



図 5-5-1 過去 86 年間の流路の移動²⁾

太線：主要な流路
点線：明治 42 年の流路

るが、黒川は不規則な蛇行形状を示している。

図 5-5-2 に余笹川の縦断面図を示す。余笹川の平均縦断勾配は、黒川合流点～JR 東北本線橋横断付近の平均河床勾配が $i=1/100$ で谷底侵食低地の様相を呈する。これより上流の 27 km 付近までは、御富士山岩屑なだれ堆積物に覆われた谷底堆積低地の様相を呈し、至る箇所流れ山が見られる。この区間は、御富士山岩屑なだれ堆積物に埋塞された箇所であつ、1 万 6 千年前から活動が活発になった茶臼岳火山噴出物 I の堆積範囲の裾野に沿って流下している平均勾配 $I=1/50$ の区間である。これより上流は V 字谷の河谷地形である。

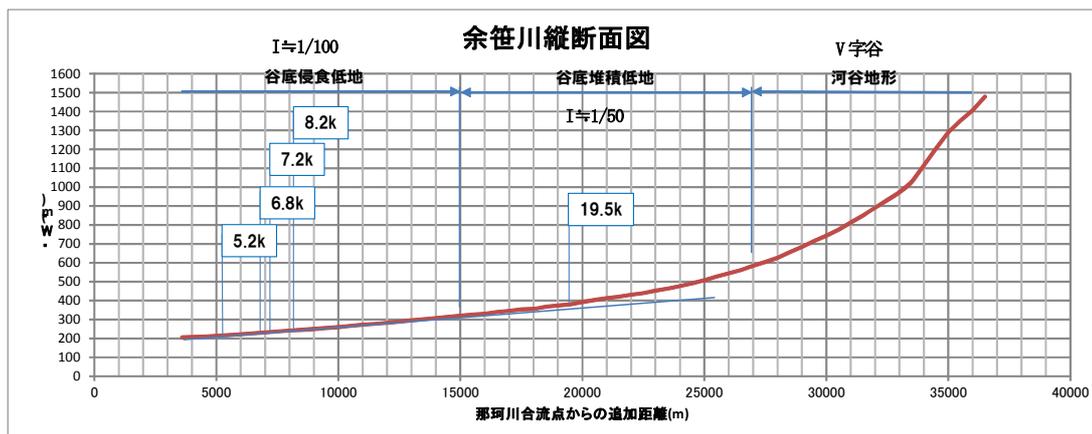


図 5-5-2 余笹川の河川縦断面図

図 5-5-3 に黒川の河川縦断面図を示す。御富士山岩屑なだれの影響をほとんど受けていないため、余笹川よりも谷底侵食低地が発達している。その平均勾配は、 $i=1/110$ で余笹川よりも若干緩い。これは黒川の流れを規制している溶結凝灰岩（白河デイスイト）が余笹川基盤岩よりも古くて硬い地質のため、河床の侵食が進まずに緩勾配になっていると考えられる。その上流の谷底堆積低地は、上流の V 字河谷から生産・流出した土砂が堆積している区間であり、余笹川の谷底堆積低地に比べ堆積厚は薄い。

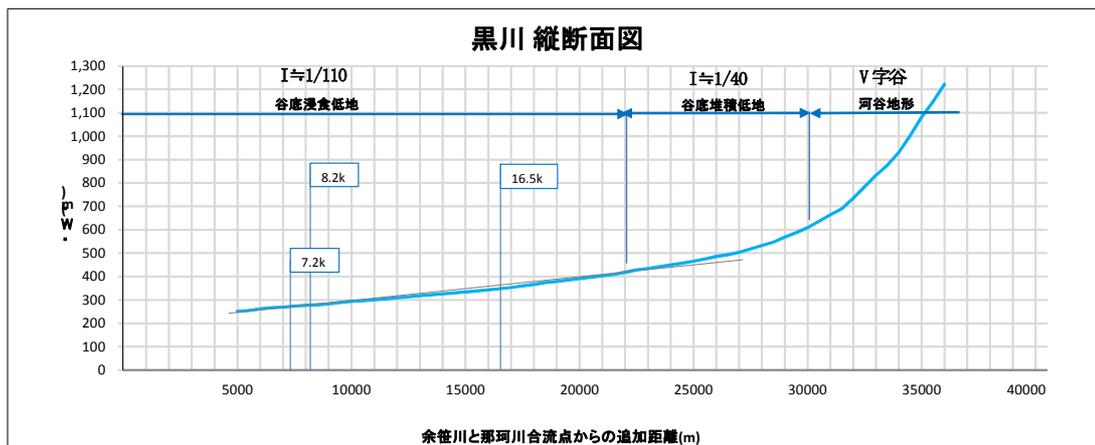


図 5-5-3 黒川の河川縦断面図

余笹川谷底侵食低地における代表粒径は、河川財団の調査結果⁴⁾を参考に0.2mとする(余笹川5.12k, 12.66k, 14.66kのd60粒径の値0.17m~0.23mの平均的な値として)。

黒川の谷底侵食低地における代表粒径は、流域面積、平均縦断勾配が余笹川とほぼ同じで河床材料も那須岳の火山砕屑物で同質なことから、0.2mで評価することとした。

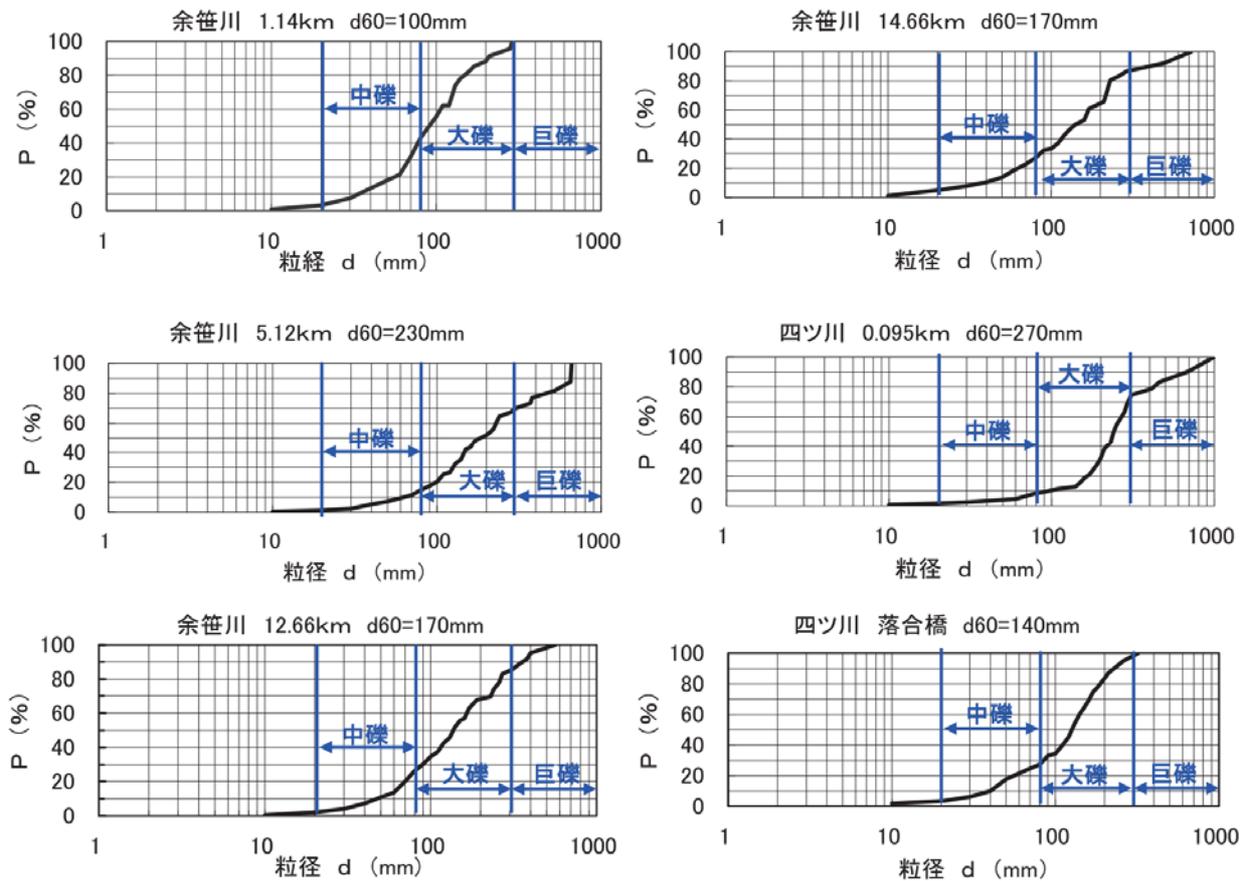


図 5-5-4 余笹川の表層の粒度分布と代表粒径⁴⁾

表 5-5-1 余笹川の河川環境区分とその特徴⁴⁾

| 河川環境区分 | 河川環境の特徴 | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------|-----------|-------------------|-------|--------|-------------|--------------------|
| | 河床勾配 | 河床材料 | 河川形態 | 淵 | 砂州 | 河岸の地形 | 植生 | 社会環境 | 主な生息魚類 |
| 余笹川 0 ~ 3.6km (那珂川合流点 ~黒川合流点) | 1/200 | d ₆₀ =100mm | Aa - Bb 移行型 | M型淵が多い | 砂州の発生する区間と無発生区間あり | 山地・丘陵 | 河畔林が多い | 集落が多く、周辺は水田 | ウグイ ヤマメ カワムツ |
| 余笹川 3.6 ~ 16km (黒川合流点~ 四ツ川合流点) | 1/60 ~ 1/150 | d ₆₀ =170 ~ 230mm | | | | 沖積低地 | | | |
| 四ツ川 | 1/34 ~ 1/130 | d ₆₀ =140 ~ 270mm | Aa II型 | S型・M型淵が多い | 少ない | 山地・丘陵 | | 集落がほとんど無い | |

5.6 1998年（平成10）8月出水と被災

余笹川流域においては、1998年8月に記録的な豪雨が発生し、余笹川上流の那須観測所では1日最大雨量640mm/日、連続雨量（約5日）1,254mmの降雨が記録された。このため、主要な河道の平均的流下能力の4倍前後という未曾有の洪水が発生し、氾濫流が谷底平野いっぱいに広がって流下した。余笹川流域の谷底平野は火山性の堆積土砂に覆われているため、洪水流が河道の側方を侵食して流路が大きく拡大され、氾濫流によって農地内に新しい流路が形成されて、激甚な被害を受けた。

表 5-6-1 余笹川の被災前河道の平均流下能力と1998年洪水比¹- Q 流量²⁾

| 余笹川区間(距離標) | 3.6~8.9k | 8.9~16.3k | 16.3k~ |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 被災前流下能力 Q_0 | 400 m ³ /s | 400 m ³ /s | 270 m ³ /s |
| 1998年洪水比 ¹ - Q 流量 Q_1 | 1,740 m ³ /s | 1,720 m ³ /s | 1,340 m ³ /s |
| Q_1/Q_0 | 4.35 | 4.30 | 4.96 |
| 備考 | 黒川合流点~棒川合流点 | 棒川合流点~四ツ川合流点 | 四ツ川合流点より上流 |

※距離標の距離は、余笹川的那珂川合流点を0kとした距離

表 5-6-2 黒川の被災前河道の平均流下能力と1998年洪水比¹- Q 流量²⁾

| 黒川区間(距離標) | 3.6~4.8k | 4.8~15.4k | 15.4~20.8k | 20.8~32.6k |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 被災前流下能力 Q_0 | 360 m ³ /s | 250 m ³ /s | 200 m ³ /s | 140 m ³ /s |
| 1998年洪水比 ¹ - Q 流量 Q_1 | 1,360 m ³ /s | 810 m ³ /s | | 680 m ³ /s |
| Q_1/Q_0 | 3.78 | 3.24 | | 4.86 |
| 備考 | 余笹川合流点~三蔵川合流点 | 三蔵川合流点~黒田川合流点 | 黒田川合流点~板敷川合流点 | 敷川合流点より上流 |

※距離標の距離は、余笹川的那珂川合流点を0kmとした距離



上) : 5.2k 付近の側方侵食崖の状況⁵⁾

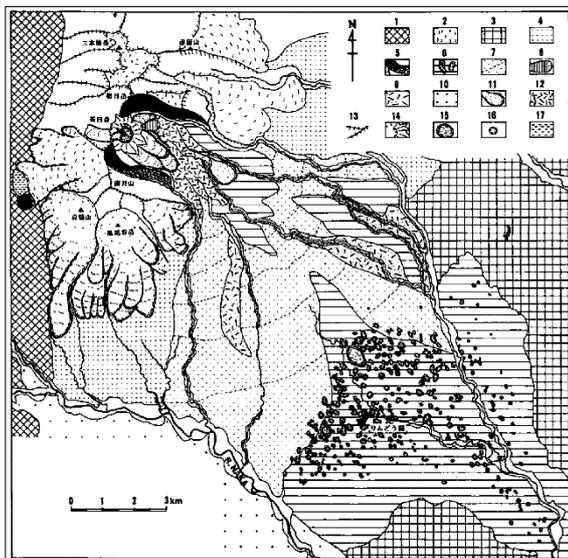
左) : 6.0k 付近の湾曲部ショートカットの状況²⁾

写真 5-6-1 湾曲部内岸側の側方侵食で湾曲部の流路がショートカットされた様子

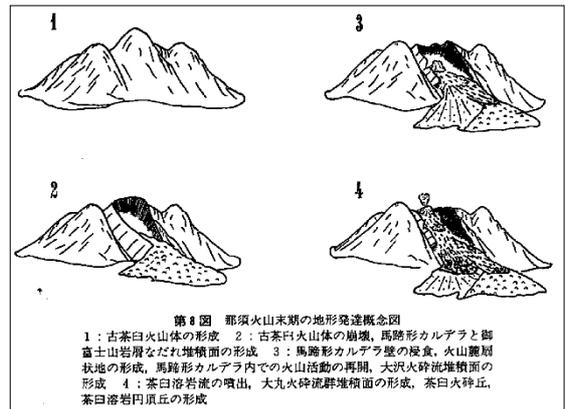
5.7 那須（茶臼岳）火山史

那須火山体周辺の地形については、藤田⁶⁾によって詳細な地形分類図が作成され、那須火山末期の地形発達概念図(過去3万年)について考察されている(図5-7-1)。一方、那須火山体周辺の地質については、(独)産業技術総合研究所によって詳細な地質図(S=1:30,000)⁷⁾が作成されているものの、余笹川の18km地点より上流が対象となっており、地質図の無い範囲については、(独)産業技術総合研究所のシームレス地質図(S=1:200,000)⁸⁾を参考とせざるを得ないのが現状である(図5-7-2)。

以上の既存資料と現地調査結果に基づき、那須岳南東山麓、余笹川周辺の地形・地質形成史について考察を行い、河川の年齢、河川の地形条件について考察した。



第2図 調査地域の地形分類図
 1: 基盤岩類 2: 古期火山原面 3: 丘陵 4: 古期火山麓扇状地 5: 馬蹄形カルデラと古茶臼火山体 6: 御富士山岩層なだれ堆積面 7: 火山麓扇状地 8: 古い火砕丘堆積物 9: 大沢火砕流堆積面 10: 那須野ヶ原主扇状地面 11: 茶臼溶岩流 12: 大沢火砕流群堆積面 13: やせ尾根 14: 茶臼火砕丘 15: 茶臼溶岩円頂丘 16: 火口 17: 湿地



第8図 那須火山末期の地形発達概念図
 1: 古茶臼火山体の形成 2: 古茶臼火山体の崩壊、馬蹄形カルデラと御富士山岩層なだれ堆積面の形成 3: 馬蹄形カルデラ壁の侵食、火山麓扇状地の形成、馬蹄形カルデラ内での火山活動の再開、大沢火砕流堆積面の形成 4: 茶臼溶岩流の噴出、大沢火砕流群堆積面の形成、茶臼火砕丘、茶臼溶岩円頂丘の形成

図5-7-1 那須火山体周辺の地形分類図と地形発達概念図(藤田, 1988)⁶⁾

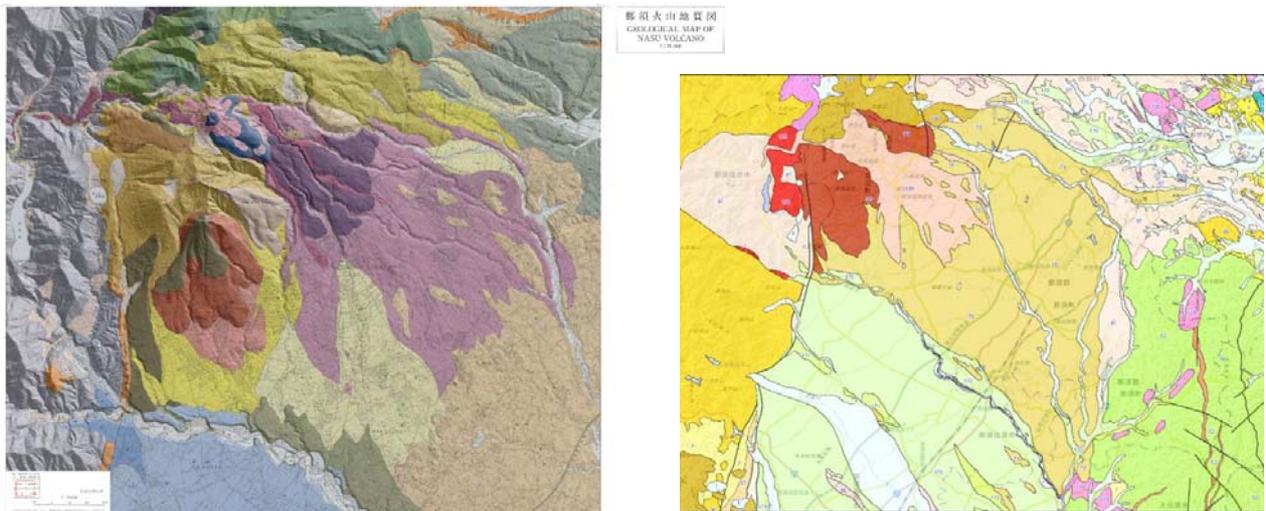


図5-7-2 那須火山体周辺の地質図((独)産業技術総合研究所)
 左が那須火山の詳細な地質図⁷⁾、右がシームレス地質図⁸⁾

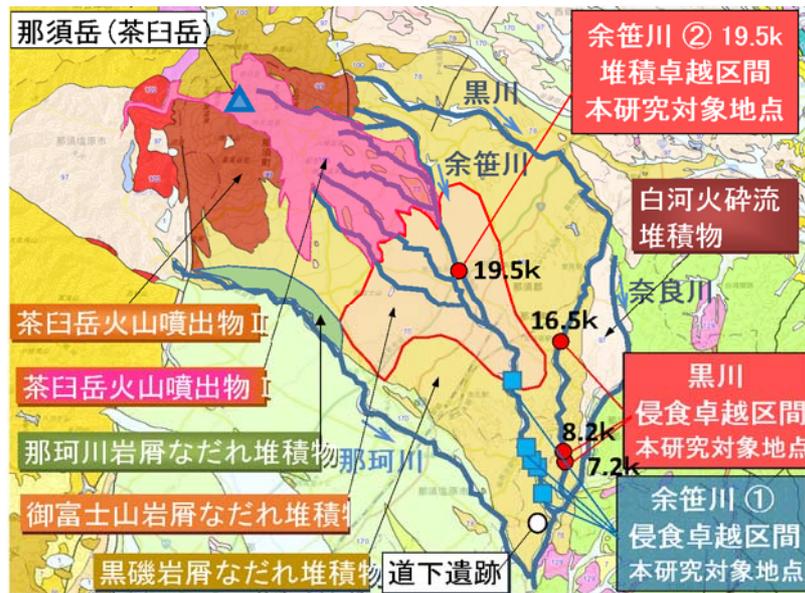


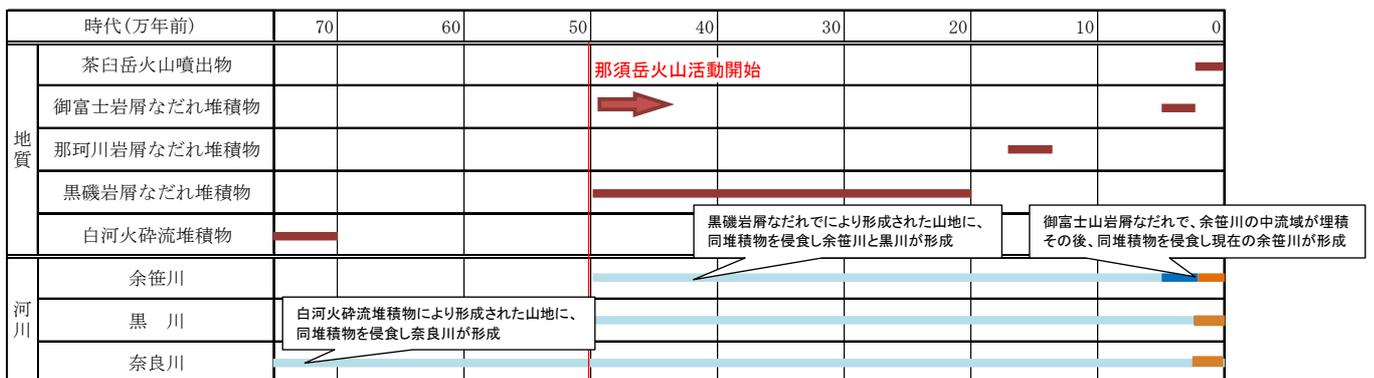
図 5-7-3 余笹川流域の表層地質平面図 (図4-2-1と同じ)

図 5-7-3 より各河川の流域に分布する表層地質について、上流から記すと以下の通りである。

- 1) 余笹川：茶臼岳火山噴出物 ⇒ 御富士岩屑なだれ堆積物 ⇒ 黒磯岩屑なだれ堆積物
- 2) 黒川：茶臼岳火山噴出物 ⇒ 黒磯岩屑なだれ堆積物
- 3) 奈良川：白河火砕流堆積物

火山史および地質形成史を整理すると以下の①～⑥ステージに分類され、河川形成過程を表 5-7-2 のように考察することができる。これより、余笹川が茶臼岳の近さから御富士山岩屑なだれの影響、茶臼岳噴火の影響を最も強く受けており、河川地形の変化は最も顕著である。

表 5-7-2 那須(茶臼岳)火山史および余笹川流域の河川形成過程



【①ステージ】

年 代：170～70 万年前

地 質：白河火砕流堆積物

奈良川が形成されたと考えられる

形成史：南会津～白河にかけて広域に分布する火砕流堆積物。170～70 万年前にはこれらの地域で大規模な火成活動があったものと考えられる。この時期、那須岳の火山活動は認められず、白河火砕流堆積物は那須岳火山噴出物の基底に広く分布したと考えられる。

【②ステージ】

年 代：20 万年前よりも古い

地 質：黒磯岩屑なだれ堆積物

余笹川、黒川が形成されたと考えられる

形成史：那須岳火山群は、約 50 万年頃に活動を開始したと考えられており、その後、那須火山体の一部(三本槍山体)が崩壊し、那須岳南東山麓に広く岩屑なだれが堆積した。

【③ステージ】

年 代：17～14 万年前

地 質：那珂川岩屑なだれ堆積物

形成史：黒磯岩屑なだれを引き起こした山体崩壊以降も、那須火山の活発な活動は継続した。三本槍山体の崩壊地には朝日岳火山が成層火山を形成し、その南には南月山火山が成層火山を形成していった。そして、南月山が山体崩壊し、那須岳南山麓に広く岩屑なだれが堆積した。

【④ステージ】

年 代：4～3 万年前

地 質：御富士山岩屑なだれ堆積物

余笹川上・中流域を御富士山岩屑なだれが埋積し、その後新たに余笹川が形成されたと考えられる

形成史：三本槍山体の崩壊地に形成された朝日岳火山の南東斜面が大きく山体崩壊し、那須岳南東山麓に広く岩屑なだれが堆積した。

【⑤ステージ】

年 代：2.5～2.4 万年前

地 質：始良火山灰

形成史：鹿児島県の始良火山が大噴火し、那須岳の山麓にも厚さ 10cm 以下の火山灰層が堆積した。この火山灰層は御富士山岩屑なだれ堆積物を覆うことが確認されている。

【⑥ステージ】

年 代：1.6 万年前～現在

地 質：茶臼岳火山噴出物

余笹川、黒川上流域を茶臼岳火山噴出物が埋積し、その後新たに余笹川、黒川が形成されたと考えられる

形成史：那須火山群で最も新しい火山活動である。茶臼岳から流れ出した溶岩・火砕流の大部分は東山麓(余笹川・黒川の上流)に、一部は西山麓(那珂川上流)に堆積した。この火山活動に伴い那須岳周辺には火山灰が広く堆積し、谷底平野においてもロームとして確認されている。

5.8 余笹川流域の歴史

(1) 那珂川上流域の歴史

那珂川はその源である那須岳が50～40万年前に南斜面で大規模な山体崩壊を起こして以来、噴火を繰り返しながら火山性堆積物が積もり、上流山地の安定化と植生の繁茂などによる流出土砂の減少に伴って侵食性河道が形成され、ほぼ現在の河道が出来上がったと考えられている。それ以降、流域には古く縄文・弥生時代より人々が集落を形成し、何耕地縄文式遺跡（縄文時代）や富岡・上田遺跡（弥生時代）等の代表的な遺跡をはじめ、当時の生活・文化を伺わせる遺跡が数多く存在するようになった。奈良・平安時代より、この付近は関東と奥州を結ぶ交通の動脈として重要な役割を担ってきており、旧東山道は源頼朝が平家討伐の命を受けそれに呼応した源義経が奥州平泉から鎌倉に向かって駆けた道で、江戸時代には宿場町として発達し、松尾芭蕉が関東から奥州へ行く際にもこの付近を通行していたといわれている。第二次世界大戦後は、那須山麓に国外からの引き揚げや国内帰農者等多くの開拓団を受け入れ、その結果、従来の山林・原野は耕地となり、また酪農も盛んになる等、次第に現在の特色を有するように移り変わってきた。

(2) 災害の歴史

那須火山群は、約1万6千年前からは、現在の那須岳（茶臼岳）が活動するようになった。この時には那須岳最大の噴火が発生し、火砕流や降灰が広い範囲に到達している。その後、那須岳は数千年おきにマグマ噴火を発生させ、数十～数百年おきに水蒸気噴火を発生させる活動を行っている。

那須岳では応永年間（1408～1410）にマグマを放出する本格的な噴火が発生した。この噴火では東側山麓に多量の硫黄混じり火山灰が降った。特に、1410年には山麓で集落が大打撃を受ける災害が発生した。これは火砕流で積雪が溶かされ発生する融雪型泥流によるものと考えられ、この時の泥流で180名の人命と多くの家畜が犠牲となった。

このようにこの地域は、那須火山の火山灰や那須火山噴出物によって形成されてきた地域であり、上流部においては土石流等が発生しやすくなっていた。このため、江戸時代においても災害が数多くあったと考えられているが、その記録はほとんど残っていない。

明治に入って、栃木県に大きな被害を与えた洪水としては、明治8年、18年、23年、29年、39年、43年等であり、大正時代では3年、8年、12年である。本地域にどの程度被害を与えたかは不明であるが、特に明治23年の災害が大きく、余笹川流域でも大きな被害を与えたとされている。

昭和前期には2年、10年、13年、16年と災害に見舞われている。特に、昭和13年9月の災害は明治23年の大水害以上の惨害を与えた。この水害は、昭和13年8月26日に発生した台風が三浦半島に上陸し、関東地方を北上したことから生じた。関東山地の東斜面及び男体山を中心とする地域では、北東あるいは東の風が猛烈に吹き付ける大雨となり、渡良瀬川、鬼怒川、那珂川の上流域では8月31日だけで300～400mmの降雨を記録した。このため、余笹川では大被害となったのである。上流部の余笹川本流（毘沙門沢）、明礬沢の合流点の直下流の北温泉地区、鍋掛村大字赤沼地区では多数の死者数を出している。

戦後においても昭和22年、23年、24年、33年、34年、36年、41年、47年、56年、57年、61年と見舞われ、平成3年、そして平成10年8月に大きな被害に見舞われた。

余笹川流域に関する過去の自然災害の記録について既存資料をもとに整理した結果を表5-8-1に示す。ただし、余笹川に限った記録は僅かであったため、那珂川本川を含めた記録を整理することとした。

過去の洪水記録をみても、1998年（平成10）の降雨量（総雨量1,254mm）は異常な降雨であったことがわかる。

表 5-8-1 余笹川流域に関する過去の大規模な自然災害

| 西暦年月日 | 災害種類 | 被害状況 | 備考 |
|----------------------------|---------|--|-----------------|
| 1397. 2. 9 (応永 4. 1. 11) | 火山噴火 | 茶臼岳爆発, 近傍各村に被害降灰. | |
| 1408. 2. 15 (応永 15. 1. 18) | 火山噴火 | 茶臼岳噴火. 硫黄の粉が降り那須川の水は数年黄色を呈した. | |
| 1410. 2. 24 (応永 17. 1. 21) | 火山噴火 | 茶臼岳噴火. 当日雷のような鳴動. 石に打たれたり, 埋まったり, 山津波のようであった. 死者 80, 牛馬多数死. | |
| 1602. 6-7 (慶長 7. 5) | 洪水 | 那須川の大洪水. 5 月上旬から下旬に及ぶ長期なもので, その量についてはきわめて漠然たるものであるが, のちの享保 8 年の洪水よりも那珂川において 1 尺以上高かったと伝えられる. | |
| 1723 (享保 8. 8) | 洪水 | 藤栖並木往来絶える. 荒神橋・新寺橋欄干の上を高瀬舟が往来する. 水戸下町は一面浸水. 千波湖増水で 1 尺 5 寸 (45cm) の水深. 浄光寺口の水深は慶長 7 年より 3 尺 (90cm) 低かった. | |
| 1728 (享保 13) | 洪水 | 9/2 にまた洪水. 享保 8 年にひとしい洪水. | |
| 1730 (享保 15. 9) | 洪水 | 8/29~9/1 にかけて洪水. 享保 8 年よりやや多い. 三の丸御殿が破損. 那珂川上流から流されてくる人家がみられた. | |
| 1757 (宝暦 7. 5) | 洪水 | 享保 8 年以来の大水. | |
| 1786 (天明 6. 7) | 洪水 | 那珂川千波湖が氾濫. 那珂川の水位は享保 8 年の水位よりも 5 尺高く, 根本町で 6 尺高, 枝川で 3 尺高と言われている. | |
| 1824 (文政 7. 8) | 洪水 | 天明 6 年以来の大水, 一の町まで溢れる. | |
| 1881. 7. 1 (明治 14. 7. 1) | 火山噴火 | 茶臼岳噴火. 鳴動激しく, 焼石・灰が河口付近でその厚さ 30cm 余. 降灰白河まで及ぶ. 那珂川の魚多数死 | |
| 1885. 10 (明治 18. 10) | | 那珂川平常水位より 6 尺 (約 1.8m) 増す | |
| 1890 (明治 23. 7. 8) | 洪水 | 那珂川で水位 2 丈 (約 6m) あがる. 川筋は一面洪水 | |
| 1896. 9. 8-16 (明治 29) | 暴風雨, 洪水 | 上流の豪雨によって那珂川氾濫し, 青柳地先に設けた量水標には 7. 42m を記録した. | |
| 1910. 8 (明治 43. 8) | 洪水 | 青柳で水位 7. 02m. 水戸で床上浸水 116 戸, 床下 272 戸, 枝川で床上 66 戸, 流出家屋 3 戸 | |
| 1914. 8 (大正 3 年. 8) | 洪水 | 那珂川の推移 2 尺 1 丈 (6. 3m) 枝川床上浸水 70 戸, 浸水家屋 100 戸, 大洪水 | |
| 1927. 7. 13 (昭和 2) | 洪水 | 豪雨の為芦野地方で増水し田浸水 10 町歩 | |
| 1935. 8. 25-27 (昭和 10) | 洪水 | 那珂川増水. 堤防決壊 6 箇所, 橋流出 1 箇所, 水田冠水 6 町歩 | 総雨量: 黒磯 273mm |
| 1938. 6 (昭和 13. 6) | | 水戸で 59 時間にわたり 491. 6m の降雨量, 下流地方の豪雨により那珂川出水. 最高水位 7. 55m | |
| 1941. 7 (昭和 16. 7) | | 降雨量 588 mm を記録. 那珂川水位 13 日 am4 時に 6. 3m . 青柳地先量水標で 8. 23m. | 降雨量: 588 mm |
| 1948. 7. 16 (昭和 23) | 梅雨 | 那珂川増水. 死者 1, 負傷者 4, 家屋倒壊 1 戸, 橋流出 1 箇所, 田畑冠水 11 町歩 | 総雨量: 宇都宮 207mm |
| 1957. 8. 6-7 (昭和 32) | 雷雨 | 死者 3, 負傷者 5, 落雷 3 戸焼失, 床上浸水 408 戸, 床下浸水 4, 847 戸, 田冠水 8, 846 町歩, 畑冠水 1, 837 町歩, 堤防決壊 23 か所 | 雨量: 大田原 266mm |
| 1964. 8. 20-25 (昭和 39) | 台風 14 号 | 床下浸水 200 戸, 堤防決壊破損 82 か所, 土木関係被害額 2 億 2, 000 万円. | 総雨量: 那須岳 466mm |
| 1977. 8. 13-19 (昭和 52) | 長雨 | 床下浸水 27 戸, 田畑冠水 288ha | 総雨量: 那須 450mm |
| 1982. 9 (昭和 57) | 台風 18 号 | 被害: 浸水家屋 201 戸 | 降雨規模: 160mm/2 日 |
| 1986. 8 (昭和 61) | 台風 10 号 | 被害: 浸水家屋 3, 580 戸 | 降雨規模: 247mm/2 日 |
| 1991. 9 (平成 3) | | 被害: 浸水家屋 336 戸 | 降雨規模: 151mm/2 日 |

5.9 本章のまとめ

余笹川流域の概要を整理した結果は以下の通りである。

- ① 余笹川の上流域は、V字谷の河谷地形を呈し、中流域は御富士山岩屑なだれ堆積物により谷底部が埋塞された谷底堆積低地が広がり、下流域に谷底侵食低地が形成されている。その変化点は河川縦断面図における勾配変化点と概ね一致する。余笹川の谷底侵食低地の平均勾配は $i=1/100$ 、谷底堆積低地の平均勾配は $i=1/50$ 。
- ② 黒川は御富士山岩屑なだれ堆積物による埋塞の影響は少ない。上流域のV字谷の河谷地形と下流域の谷底侵食低地との間にある縦断面勾配の変化点の区間は、上流のV字谷から生産された土砂が谷幅の拡大とともに扇状地状に土砂が堆積し谷底堆積低地の様相を呈している。黒川の谷底侵食低地の平均勾配は $i=1/110$ 、谷底堆積低地の平均勾配は $i=1/40$ 。
- ③ 黒川の東側に分布する八溝山地の地質は、中生代に堆積した砂岩と粘板岩の互層を主体とし、所々で花崗岩の貫入が見られる。その西側に広がる高久丘陵は、火山碎屑物（那須火山を起源とする火山角礫岩、岩屑なだれ堆積物とその上に堆積する火山灰層（関東ローム層））からなる。余笹川及び黒川はこれを開析し谷底低地を形成している。これらの下位には、丘陵地のほぼ全域にわたって溶結凝灰岩（白河デイサイト）が分布している。さらに、段丘部分には上流域や周辺の山地、丘陵から供給された砂礫が堆積している。
- ④ 余笹川那珂川合流点から16kmまでとその右支川四ツ川周辺の高久丘陵には、岩屑なだれ堆積物が厚く分布している。余笹川6.5kmより上流には4~3万年前の御富士山岩屑なだれ堆積物が表層に堆積し、その下流には黒礫岩屑なだれ堆積物が堆積する。
- ⑤ 余笹川流域の那須高原観測所における年平均降水量は2,000mmで日本の平均よりも幾分多い。1998年豪雨では総降水量が1,254mmであった。
- ⑥ 余笹川と黒川は河川の規模（流域面積）はほとんど同じであり、調査対象範囲においては、余笹川と黒川は標高300~500mの丘陵に囲まれた谷底平野を蛇行しながら大局的には南へ流下している。谷底平野の幅は100~500m（平均300m）で、下流ほど幅が広い。谷底幅の広い箇所では旧河道の痕跡を数多く確認できる。
- ⑦ 上野は、過去86年間の流路の移動を調べた結果より、蛇行河道は谷底平野内を徐々に下流あるいは横方向へと移動しながら現況の谷底平野の形態を造ったと考察している。
- ⑧ 余笹川の流路は、那須岳を中心とする同心円状の等高線にほぼ直角になるように南南西方向に蛇行しながら流下している。一方、黒川は東側の溶結凝灰岩（白河デイサイト）に規制されほぼ直線的に南流しており、余笹川に比べて流路が直線的な区間が多くみられる。この結果、余笹川では概ね河流蛇行と河谷蛇行は概ね同じ波長で比較的規則的な蛇行形状であるが、黒川は不規則な蛇行形状を示している。このように流路形状は地質的影響を受けやすく、黒川の平面線形にそれが現れている。
- ⑨ 余笹川谷底侵食低地における代表粒径は、河川財団の調査結果より0.2m程度である。本研究では、黒川の谷底侵食低地における代表粒径は、現地調査結果、及び流域面積、平均縦断面勾配が余笹川とほぼ同じで河床材料も那須岳の火山碎屑物で同質なことから、0.2mで評価することとした。
- ⑩ 1998年8月豪雨は、河道の平均的流下能力の4倍前後という未曾有の洪水となり、氾濫流が谷底平野いっぱい広がって流下した。余笹川流域の谷底平野は火山性の堆積土砂に覆われているため、洪水流が河道の側方を侵食して流路が大きく拡大され（流路幅が3~5倍拡大）、氾濫流によって農地内に新しい流路が形成され、激甚な被害を受けた。
- ⑪ 火山史を整理し、余笹川、黒川、奈良川の河川形成過程を考察した。これより、余笹川が茶臼岳の近さから御富士山岩屑なだれの影響、茶臼岳噴火の影響を最も強く受けており、河川地形の変化は最も顕著である。

【参考文献】

- 1) 那珂川水系河川整備基本方針, 国土交通省河川局, 平成 18 年 3 月.
- 2) 上野鉄男: 余笹川流域の 1998 年水害の発生構造について, 自然災害科学 24-3, pp. 303-321, 2005.
- 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 地理調査部技術ノート第 17 号, pp87-103, 1999
- 4) 大規模災害復旧工事後の河道・環境特性の変化—余笹川の事例—, (財)河川環境管理財団河川環境総合研究所, 河川環境総合研究所資料第 27 号, 2009
- 5) 佐藤照子: 1998 年 8 月那珂川水害の被害と土地環境, 科学技術庁, 主要災害調査第 37 号, pp 137-216, 2001.
- 6) 藤田和久: 那須火山最近 4 万年間の地形の発達, 金沢大学文学部地理学報告, No. 4, pp111-123, 1988
- 7) 那須火山地質図, 通商産業省 工業技術院 地質調査所, 1997.
- 8) (独)産業技術総合研究所シームレス地質図

第6章 余笹川流域の谷底侵食低地における極值的流量の推定

第5章で整理した余笹川流域の河川特性をもとに第3章の極値流量推定手法に基づき余笹川及び黒川の谷底侵食低地での極値流量の推定を試みる。

6.1 余笹川における1998年(平成10)豪雨に関する既往研究のレビュー

余笹川流域においては、1998年8月に記録的な豪雨が発生し、余笹川上流の那須観測所では1日最大雨量640mm/日、連続雨量(約5日)1,254mmの降雨が記録された。このため、主要な河道の平均的流下能力の4倍前後という未曾有の洪水が発生し、氾濫流が谷底平野いっぱいに広がって流下した。余笹川流域の谷底平野は火山性の堆積土砂に覆われているため、洪水流が河道の側方を侵食して流路が大きく拡大され、氾濫流によって農地内に新しい流路が形成されて、激甚な被害となった。

余笹川の1998年水害に関して、これまで中川・他(2000)¹⁾、伊藤・他(2000, 2001)²⁾³⁾、館・他(2001)⁴⁾、佐藤(2001)⁵⁾、栗山・他(2004)⁶⁾に、上野(2005)⁷⁾によって調査研究がなされた。中川らは現地調査と災害前後の航空写真をもとにして東北自動車道より上流において1998年洪水による余笹川の河道変動について検討し、同時にタンクモデルによる流出解析から得られたハイドログラフを用いて河道変動解析を行った。伊藤らは流路幅の拡大と新流路の形成、これらに伴う土砂生産と流木生産が1998年洪水の重要な特徴であること、多くの場合に蛇行部で洪水流のショートカットによって新流路が形成されたことを指摘した。また、新流路は洪水時の主流と洪水前の流路との不一致によって形成されたと説明し、横侵食の実態を定量的に示した。

館らは防災樹林帯の効果に関して検討し、多くの家屋が上流側に杉や竹の樹林を有しており、樹林の密度が疎であるか密であるかが樹林と家屋が流失するかどうかを決定することを指摘した。佐藤は被害と土地環境との関連に注目して、寺子地区、沼野井地および稲沢地区の災害実態を詳しく調査した。しかし、新流路の形成に関しては十分な説明がなく、「洪水が谷底平野のほぼ全域を浸水させ、洪水流が直進したために新流路が形成された」と述べている程度である。

栗山らは国道4号橋梁の上下流の河床変動と河岸侵食について、現地調査、模型実験、数値解析を用いて検討し、上流からの掃流土砂量が大きく、河道条件により河床上昇が発生するような箇所では、流心の移動によって河岸の侵食が引き起こされることを明らかにした。

上野は、新流路形成の観点から余笹川流域の水害実態を調べ、地域の開発状況や農地の整備状況など社会的側面からの被災特性も考察し、山地河川水害に対する防災・減災のための河道管理の在り方を提言している。新流路形成については、流路湾曲部内岸側をショートカットするパターンを被災前の河幅との関係で整理している。本研究では、新流路形成箇所さらに着目し、新流路形成箇所周辺の地形・地質を詳細に調査し、その成り立ちを明らかにすることにより、過去の大規模洪水の痕跡を調べ極値流量の推定を試みるものである。

6.2 余笹川における極值的流量に関する既往研究のレビュー

坂口ら⁸⁾は、余笹川の1998年(平成10)大洪水により大規模な流路侵食や洗掘等が発生したことから、この流量を河道形成流量とする河幅の検討を行っている。

谷底平野で氾濫流が発生すると、河道が大きく蛇行している区間や水深が極めて浅く、流速が小さくなる場所がある。さらに、氾濫流が河道を短絡し、新しい流路を形成するような複雑な流れが生じるため、これらの状況を適切に考慮するために、余笹川で発生した洪水後の河道形状を対象に平面二次元洪水流解析を適用し、氾濫域での洪水流況から河道形成流量が流下したと見なせる流水幅を検討している。

その結果、1998年(平成10)洪水ピーク流量の99%流量流下時の流水幅 B 99 が河道形成における意味のある河幅であり、その河幅で福岡の式を適用することにより極値流量推定の可能性を示している。99%流量流下時の流水幅が意味のある河幅であるとの結論は非常に興味深く、本研究では現地でその河幅が何を意味しているのかを地質学的、河川工学的視点で詳細に確認することとする。

6.3 余笹川の谷底侵食低地における極值的流量の推定

6.3.1 余笹川検討断面の選定

本研究では、第3章で述べたように谷底侵食低地の侵食地形に着目する。

余笹川の縦断面図を図6-3-1に示す。図4-2-1に示したように15k付近から27k付近までの中流域は、御富士山岩屑なだれ堆積物による谷底内埋塞の影響を受けたこと、V字谷の上流域から生産された土砂が堆積しやすい場であることから堆積が卓越する谷底堆積低地が形成されている。その下流は土砂の流入よりも流出が卓越する谷底侵食低地が続く。本研究の検討区間は、この谷底侵食低地である。

河川は谷底内を蛇行しているが、谷底部も大局的には蛇行している。大規模洪水時には、谷底幅一杯に流下することから、谷底部中心線が大規模洪水時の流心線と考えられる。安定した流況箇所の方が現象は分かりやすいことから、この谷底部中心線が直線区間の箇所を検討断面として選定することとする。また、谷底低地はほとんどが耕作地であり、圃場整備などの地形改変により現在の段差位置は自然に形成された段差位置と異なる可能性がある。そこで、極力人工改変の影響を受けていない段差位置を把握する必要から昭和22年に米軍が撮影した空中写真判読により、河川縦断方向に連続した段差を明瞭に確認できる箇所を選定することとした。

図6-3-2に検討断面位置図を示す。検討断面は、下流から5.2k、6.8k、7.2k、8.2kの4断面とする。

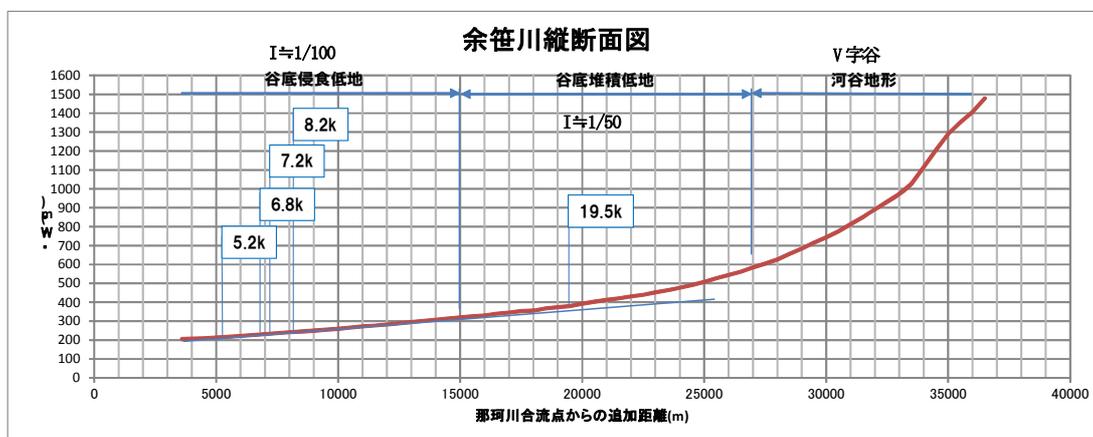


図6-3-1 黒川合流点より上流の余笹川河川縦断面図

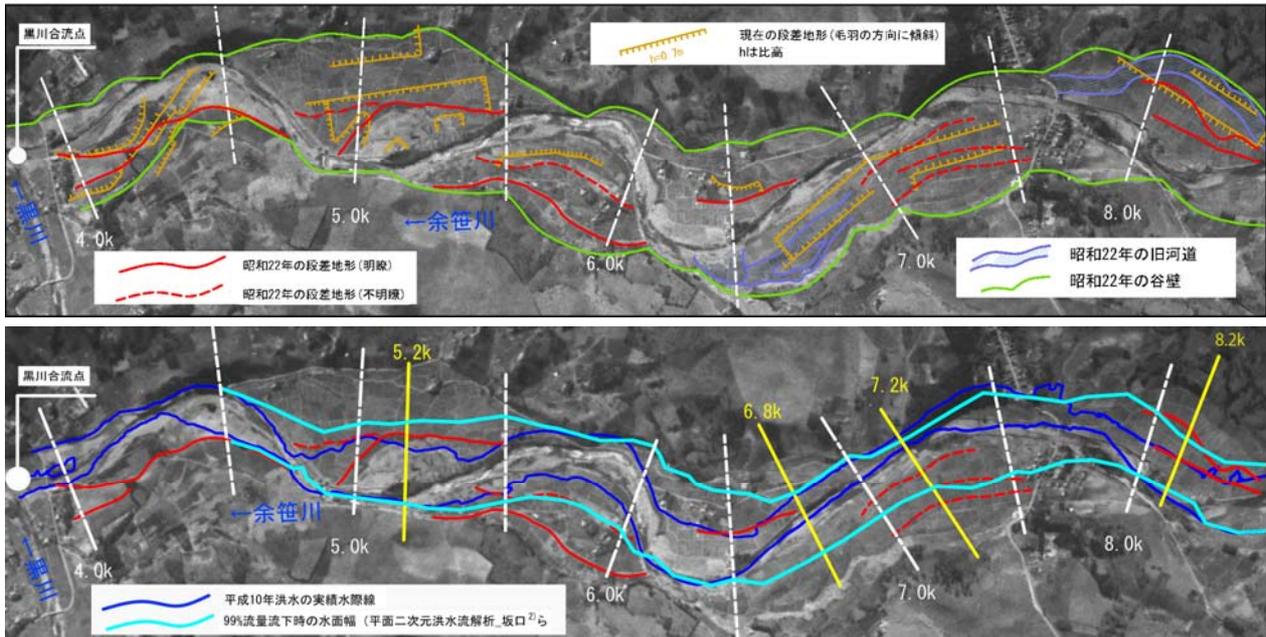


図 6-3-2 余笹川谷底侵食低地の検討断面位置図 (5.2k, 6.8k, 7.2k, 8.2k) 背景は昭和22年米軍撮影空中写真

図 6-3-2 より、以下のことがわかる。

- 現在の段差位置と昭和22年空中写真判読で確認された段差位置を重ねた結果、5.0k付近は異なる部分もあるものの、7.0k付近は概ね一致している。また、段差は河川縦断方向に比較的連続している。
- 谷底横断方向にみた場合、段差は1段若しくは2~3段を確認できる。
- 谷壁を緑色線で表記した結果、谷壁法線は直線形状ではなく円弧状の連続形状である。このことから、谷底部を流れる河川の蛇行により谷壁が侵食・拡大していることが分かる。
- 谷底低地には現在河川の流れが無い箇所に凹地があり旧河道跡と判断できる。
- 湾曲部において、内岸側をショートカットし側方侵食が拡大した箇所 (5.2k, 8.2k) と側方侵食が拡大しなかった箇所 (7.2k) が確認される (青色線が1998年 (平成10) 洪水時の側方侵食崖位置を表している)。
- 坂口らが設定した1998年 (平成10) 洪水ピーク流量の99%流量の水際線は、現在の高位の段差地形位置と概ね一致している。
- 1998年 (平成10) 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ことが多い。

6.3.2 現地での段差の計測及び表層地質の調査方法（検土杖の説明）

本研究は、1998年（平成10）洪水時（黒川合流点直上流でのピーク流量 $Q=1,740\text{m}^3/\text{s}$ ）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）の持つ意味を地質学的・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った。

段差の計測は簡易水準測量により行い、段差の上段・下段の高低差、河床からの比高差などを測定した。耕作地はほぼ水平と考え、簡略化した谷底低地の横断地形を作成した。

谷底低地表層の堆積土砂の土質構成、層序を把握する目的より、検土杖で段差の上段、下段で試料採取を行い、Grain Size Scaleを用いた目視と指先での触診により、表6-3-1の粒度階を用いて粒度区分（土質区分）を行った。

【検土杖を用いた手軽な調査により表層の土質を把握】

検土杖：土質調査のため、地中の土砂を採取するのに用いる棒状の器具。棒の長さは1～3m。先端部に30cmの縦溝が彫り込まれ、この溝の深さまで棒を差込んで回転すると、溝の中に地中の土砂が取込まれ、土を採取することができる。目視・触診により土質分類を細かく判断できる。安価に手軽に調査を行うことができる。

また、貫入抵抗が大きい場合は、土質の締め具合を定量的に評価するためにポータブルコーン貫入試験も併用した。

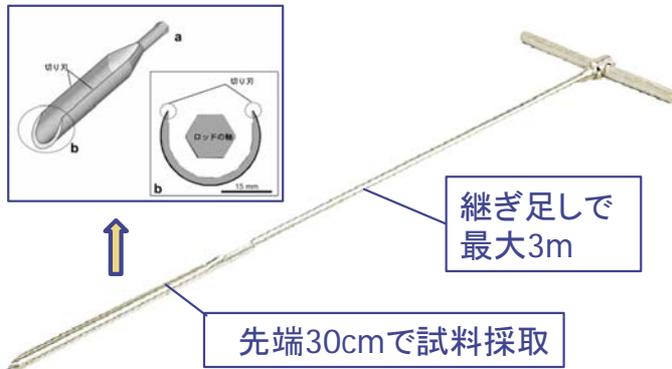


表6-3-1 粒度階の粒径区分（地盤工学会資料より）

| | | 粒径 (mm) | | | | | | | | |
|-----|-----|---------|-------|------|------|----|------|----|----|-----|
| | | 0.005 | 0.075 | 0.25 | 0.85 | 2 | 4.75 | 19 | 75 | 300 |
| 粘土 | シルト | 細砂 | 中砂 | 粗砂 | 細礫 | 中礫 | 粗礫 | 粗石 | 巨石 | |
| | | 砂 | | | 礫 | | | 石 | | |
| 細粒分 | | 粗粒分 | | | | | | 石分 | | |



Grain Size Scale

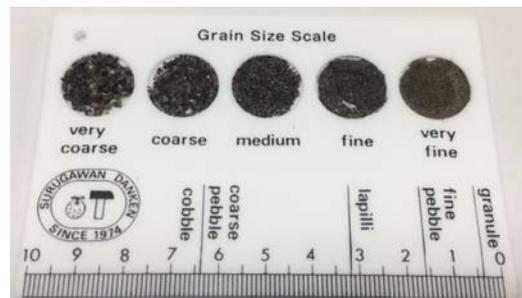


写真6-3-1 検土杖の概要および調査状況

6.3.3 堆積土砂の年代測定方法

検土杖で調査した表層 1~2m の深さにある堆積土砂の堆積年代を把握するために、検土杖で採取した試料を用いて放射性炭素年代測定 (C14 法) を行うこととした。この年代を調べることにより、谷底低地の河川堆積物の形成年代が明らかとなる (現世の事象であることの根拠)、極値流量発生時期を絞り込みやすくなる、谷底低地の形成過程が整理されるなどの利点を得られる可能性がある重要な試験となる。

(1) 放射性炭素年代測定の原理

自然界には、同一の元素であるものの、中性子の数が異なるものが存在することが知られている。このような元素は同位体とよばれ、安定したものと不安定なものに区分される。不安定なものは、時間の経過とともに、原子核は徐々に放射性崩壊し微弱な放射線を放出しながら安定した原子核へと変化していく。この放射壊変に要する時間は指数関数的に減少していくのであるが、元素の種類によって減少の割合が大きく異なり、数千年~数 10 億年という年代幅をもっている。

炭素(元素記号 C)には、同位体として ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C が存在することが知られている。これらの同位体は、同じ割合で存在しているのではなく、炭素の 99% は ^{12}C で、残りの 1% が ^{13}C である。そして、 ^{14}C は $1/10^{10}$ 程度と見積もられている。これらのうち、 ^{14}C は ^{12}C や ^{13}C と異なり、微弱な放射線を放出しながら放射壊変する性質を有することから、放射性炭素とよばれている。この ^{14}C は時間の経過とともに放射壊変し、窒素 (^{14}N) へと変化していくが、これに要する時間(半減期)は 5,730 年と推定されている (図 6-3-3)。

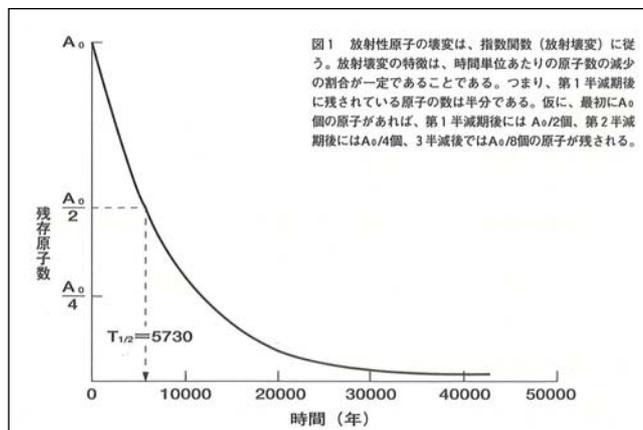


図 6-3-3 放射性炭素の放射壊変

^{14}C を用いた年代測定は、以下の仮説のうえに成り立つものである。

- ① 大気中の ^{14}C 濃度は時代を遡っても常に一定である。
- ② 生物と大気の炭素の混合は急速であり、濃度は一定に保たれている。
- ③ 動植物が死ぬと、生物と大気の ^{14}C の交換は停止する。
- ④ ^{14}C の交換が停止した後は、動植物の ^{14}C 濃度は放射壊変によってのみ変化する。

これらの仮説のうち、とくに、①については、無視できるほどに小さいものではなく、さまざまな不一致を引き起こす原因となることがある。この原因は、地球に飛来する宇宙線強度や地球規模の炭素循環の変化によって、

$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の比は時代とともに変化していることにある。このため、近年では、分析により得られた ^{14}C 年代を較正する手法が用いられている(図 6-3-4)。

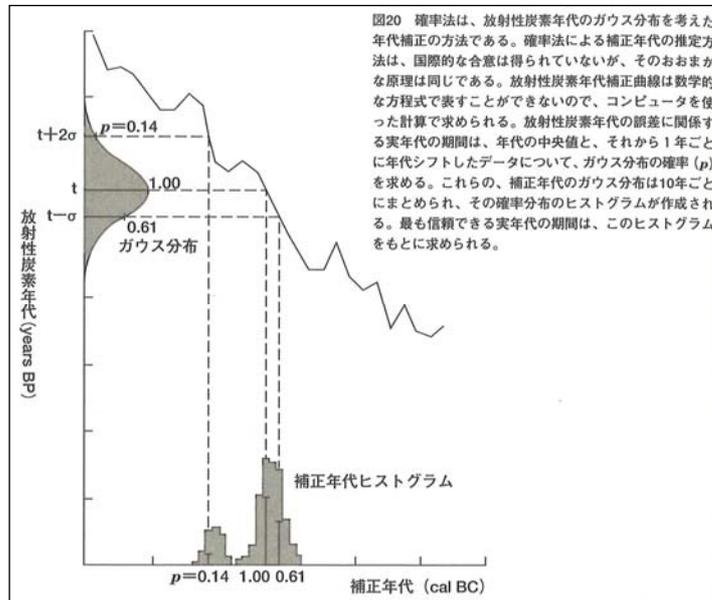


図 6-3-4 放射性炭素年代測定結果の較正

【シェリダン・ボウマン「年代測定」1998年】より抜粋

^{14}C は上空の大気(厳密に言えば成層圏の下層部と対流圏の上層部)で、宇宙線起源の中性子と窒素原子が反応して生成される。 ^{14}C は宇宙線の作用で生成される数少ない原子核の一つで、生成後、瞬時に酸素と結合し、二酸化炭素となる。この二酸化炭素は、他の炭素同位体を含む二酸化炭素と区別をつけることができない。二酸化炭素は大気中に拡散し混合する。さらに、海洋に溶解し、光合成や食物連鎖のプロセスを経て生物圏とよばれている動植物の一部となる。 ^{14}C の生成率が一定なら、生成と壊変のあいだに平衡が成立し、大気中の ^{14}C 濃度は一定となる。したがって、生存している動植物の ^{14}C 濃度は一定である。

動植物が死ぬと、大気と生物の炭素交換が停止し、新たに ^{14}C を取り込まなくなる。 ^{14}C が安定な同位体なら、動植物の死後も変化はしないのだが、 ^{14}C は不安定なので、動植物の ^{14}C 濃度(A_0)は時間とともに指数関数的に減少する(図 7)。t 年後に動植物に残されている ^{14}C の個数(A)は、次式で求めることができる。

$$A=A_0e^{-\lambda t}$$

ここで、 λ は平均寿命 τ の逆数に等しい定数である。一般に知られている放射壊変の半減期 $T_{1/2}$ は平均寿命(λ)と次の式で関係づけられる。

$$T_{1/2}=(\ln 2) \tau \quad \text{または} \quad T_{1/2}=0.693 \tau$$

\ln は e を底とする自然対数である。平均寿命と半減期は放射性炭素に特有なもので、 ^{14}C の半減期 $T_{1/2}$ 値は 5,730 年と推定されている。しかし、慣習的には、リビーの半減期が放射性炭素年代を求める計算式に用いられている。リビーの半減期は 5,568 年で、真の半減期より 3% だけ小さく、その平均寿命は 8,033 年である。放射性炭素年代を求める年代方程式は次式のように定義されている。

$$t=-\tau \ln(A/A_0) \quad \text{または} \quad t=-8033 \ln(A/A_0)$$

(2) 放射性炭素年代測定の方法

①化学処理工程

- 1) メス・ピンセットを使い、必要量を採取する。
- 2) 酸-アルカリ-酸(AAA : Acid Alkali Acid)処理により不純物を化学的に取り除く。その後、超純水で中性になるまで希釈し、乾燥させる。AAA 処理における酸処理では、通常 1mol/l(1M)の塩酸(HCl)を用いる。アルカリ処理では水酸化ナトリウム(NaOH)水溶液を用い、0.001Mから1Mまで徐々に濃度を上げながら処理を行う。アルカリ濃度が1Mに達した時には「AAA」、1M未満の場合は「AaA」と表1に記載する。
- 3) 試料を燃焼させ、二酸化炭素(CO₂)を発生させる。
- 4) 真空ラインで二酸化炭素を精製する。
- 5) 精製した二酸化炭素を、鉄を触媒として水素で還元し、グラファイト(C)を生成させる。
- 6) グラファイトを内径1mmのカソードにハンドプレス機で詰め、それをホイールにはめ込み、測定装置に装着する。

②測定方法

加速器をベースとした¹⁴C-AMS専用装置(NEC社製)を使用し、¹⁴Cの計数、¹³C濃度(¹³C/¹²C)、¹⁴C濃度(¹⁴C/¹²C)の測定を行う。測定では、米国国立標準局(NIST)から提供されたシュウ酸(HOx II)を標準試料とする。この標準試料とバックグラウンド試料の測定も同時に実施する。

③算出方法

- 1) $\delta^{13}\text{C}$ は、試料炭素の¹³C濃度(¹³C/¹²C)を測定し、基準試料からのずれを千分偏差(‰)で表した値である。AMS装置による測定値を用い、表中に「AMS」と注記する。
- 2) ¹⁴C年代(Libby Age : yrBP)は、過去の大気中¹⁴C濃度が一定であったと仮定して測定され、1950年を基準年(0yrBP)として遡る年代である。年代値の算出には、Libbyの半減期(5568年)を使用する(Stuiver and Polach 1977)。¹⁴C年代は $\delta^{13}\text{C}$ によって同位体効果を補正する必要がある。補正した値を表1に、補正していない値を参考値として表2に示した。¹⁴C年代と誤差は、下1桁を丸めて10年単位で表示される。また、¹⁴C年代の誤差($\pm 1\sigma$)は、試料の¹⁴C年代がその誤差範囲に入る確率が68.2%であることを意味する。
- 3) pMC (percent Modern Carbon)は、標準現代炭素に対する試料炭素の¹⁴C濃度の割合である。pMCが小さい(¹⁴Cが少ない)ほど古い年代を示し、pMCが100以上(¹⁴Cの量が標準現代炭素と同等以上)の場合Modernとする。この値も $\delta^{13}\text{C}$ によって補正する必要があるため、補正した値と補正していない値を参考値として示した。
- 4) 暦年較正年代とは、年代が既知の試料の¹⁴C濃度をもとに描かれた較正曲線と照らし合わせ、過去の¹⁴C濃度変化などを補正し、実年代に近づけた値である。暦年較正年代は、¹⁴C年代に対応する較正曲線上の暦年代範囲であり、1標準偏差($1\sigma = 68.2\%$)あるいは2標準偏差($2\sigma = 95.4\%$)で表示される。グラフの縦軸が¹⁴C年代、横軸が暦年較正年代を表す。暦年較正プログラムに入力される値は、 $\delta^{13}\text{C}$ 補正を行い、下1桁を丸めない¹⁴C年代値である。なお、較正曲線および較正プログラムは、データの蓄積によって更新される。また、プログラムの種類によっても結果が異なるため、年代の活用にあたってはその種類とバージョンを確認する必要がある。ここでは、暦年較正年代の計算に、IntCal13データベース(Reimer et al. 2013)を用い、OxCal v4.2較正プログラム(Bronk Ramsey 2009)を使用した。暦年較正年代については、特定のデータベース、プログラムに依存する点を考慮し、プログラムに入力する値とともに参考値として示した。暦年較正年代は、¹⁴C年代に基づいて較正(calibrate)された年代値であることを明示するために「cal BC/AD」または「cal BP」という単位で表される。

6.3.4 調査結果の整理及び考察

5.2k, 6.8k, 7.2k, 8.2k の測線における地形・地質の調査結果を図6-3-3~6-3-6に示す。

放射性炭素年代測定の結果は、後述(7.3 余笹川及び黒川の放射性炭素年代測定からの谷底形成過程の考察)でまとめて記載し考察する。

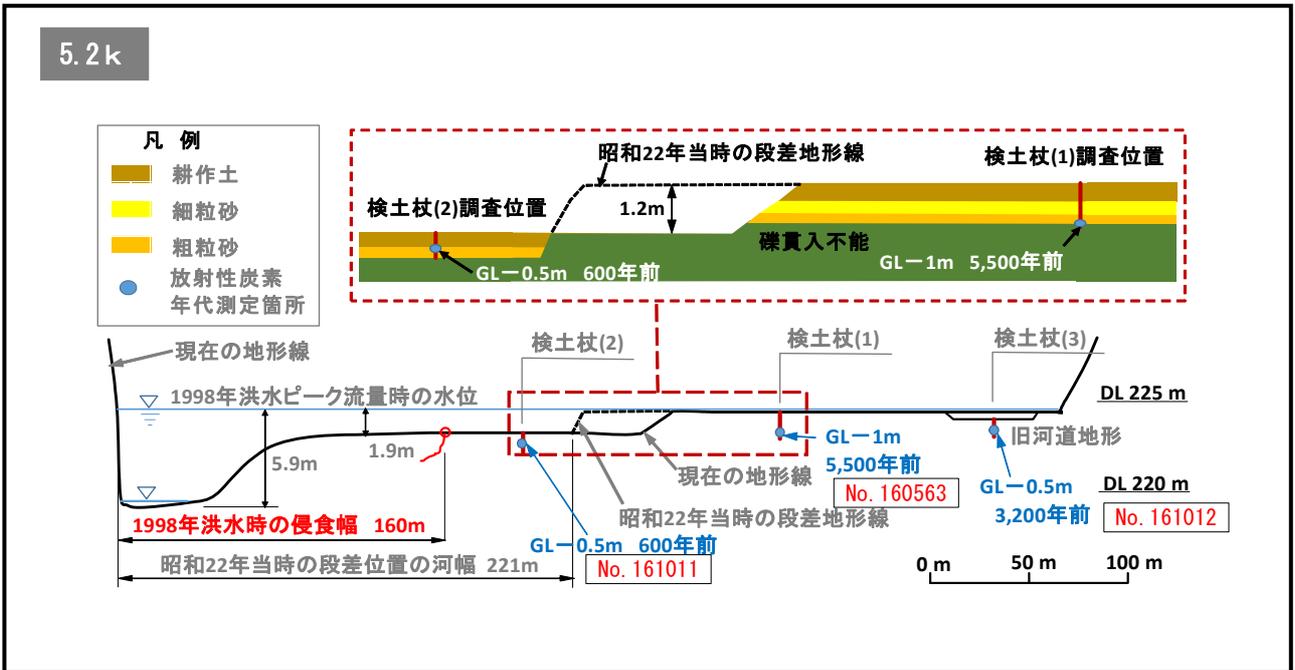


図6-3-5 地形・地質調査結果 (余笹川 5.2k)

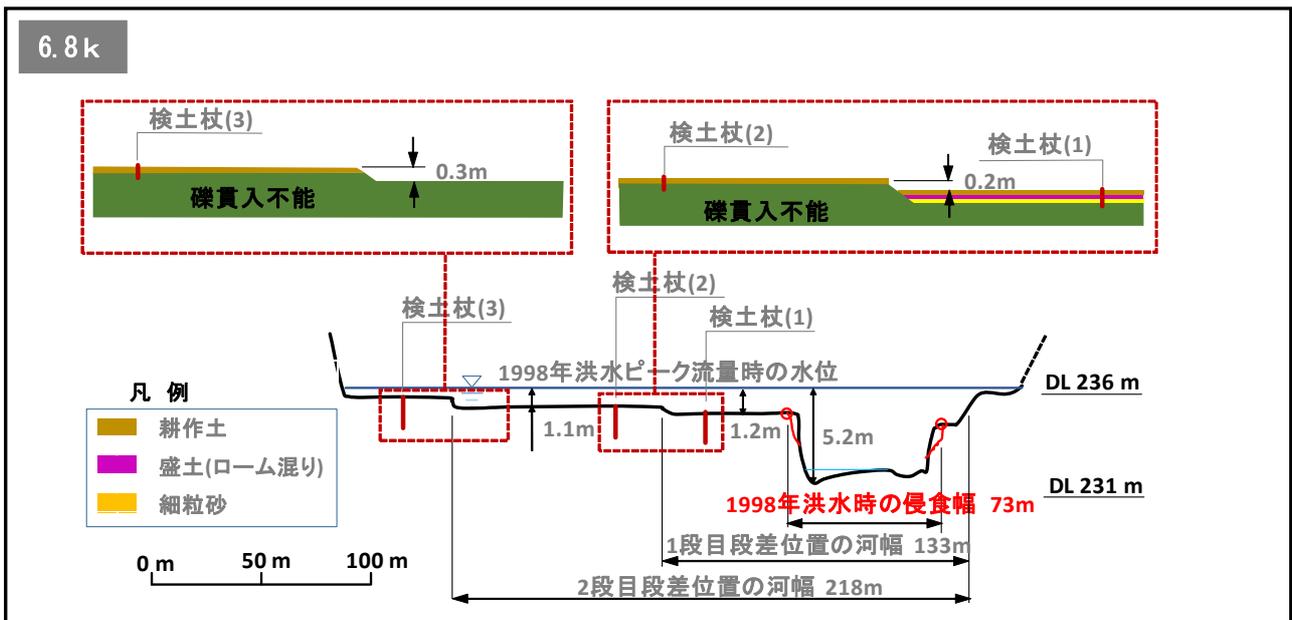


図6-3-5 地形・地質調査結果 (余笹川 6.8k)

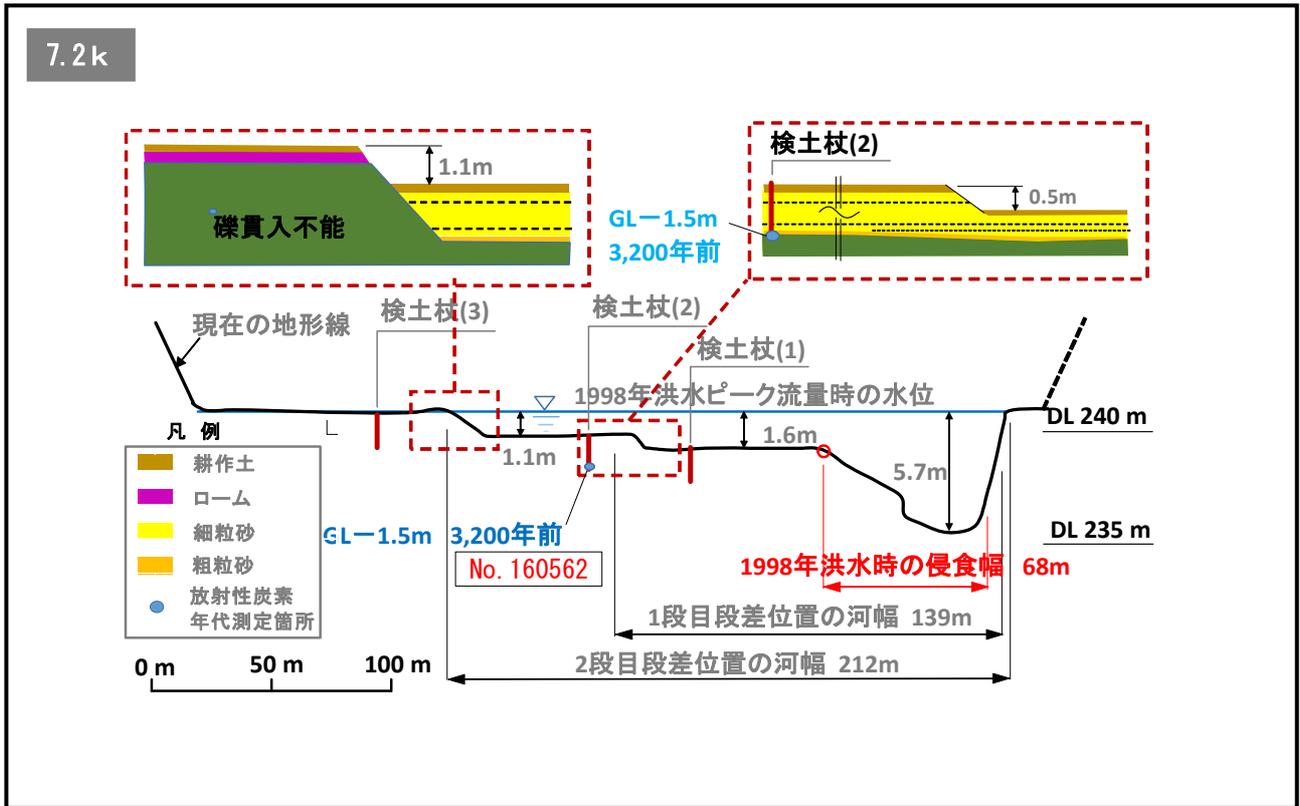


図 6-3-5 地形・地質調査結果 (余笹川 7.2k)

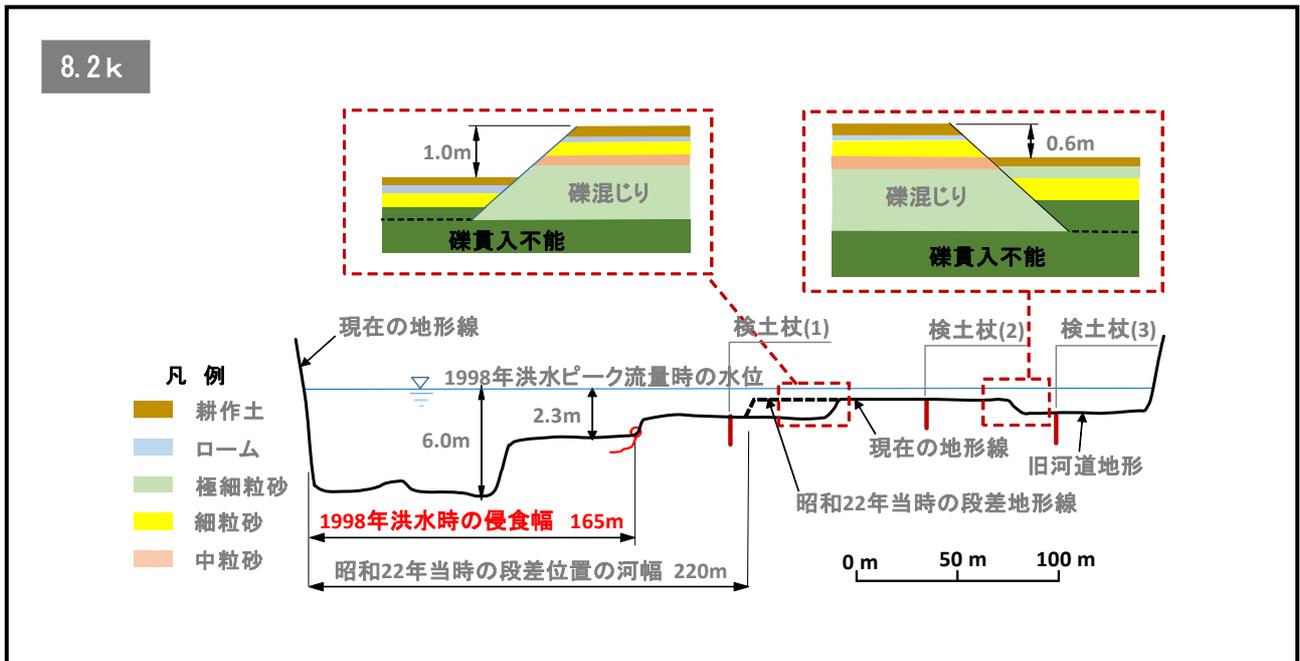


図 6-3-6 地形・地質調査結果 (余笹川 8.2k)

調査結果から以下のことが分かった。

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、谷底幅の広い箇所の代表断面 4 測線 (5. 2k, 6. 8k, 7. 2k, 8. 2k) で実施した (図 6-3-3 ~6-3-6 参照)。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 2 段目, 8. 2 右岸 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と考えられ、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。
- 4) 坂口らは谷底低地を流れる河川の河道形成流量の河幅は、1998 年 (平成 10) 洪水ピーク流量の 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 6-3-2 に示す通り、今回確認した高位段差位置 (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。

表 6-3-1 余笹川谷底侵食低地の測定結果及び解析結果

| 距離標 | 平成10年 洪水流量 Q(m ³ /s) | 水面 勾配 ^{※1)} 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 ^{※2)} 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 |
| 8.2k | 1,740 | 0.010 | 3.7 | 1.1 | 1.0 | 95 | 165 | 165 | 220 | 408 | 580 | 0.16 |

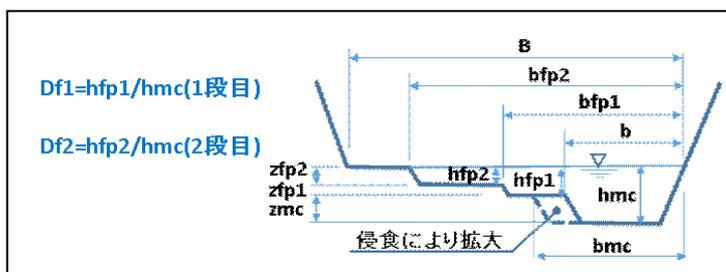
| 距離標 | 低水路 水深 hmc(m) | 1段目 水深 hfp1(m) | 2段目 水深 hfp2(m) | 水深比 D _r | | 蛇行度 S | 無次元 流量 (H10) Q/(gd ⁵) ^{0.5} | 無次元 侵食幅 bmc/d | 無次元 水深 ^{※3)} h/d | 無次元 河幅 (1段目) bfp1/d | 無次元 流量 (1段目) Q/(gd ⁵) ^{0.5} | 1段目河幅 形成流量 Qp(m ³ /s) | 無次元 河幅 (2段目) bfp2/d | 無次元 流量 (2段目) Q/(gd ⁵) ^{0.5} | 2段目河 幅形成 流量 Qp(m ³ /s) |
|------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------|----------|---|---------------------|---------------------------------|------------------------------|---|--|------------------------------|---|--|
| | | | | 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 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 8.2k | 6.0 | 2.3 | 1.2 | 0.383 | 0.200 | 1.02 | 310,714 | 825 | 825 | 3.1E+05 | 1,740 | 1,100 | 6.4E+05 | 3,572 | |

※1) Ie: 坂口らの平面二次元洪水解析結果の水面勾配⁸⁾

※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/s²)、d: 河床材料代表粒径(d60=20cm)⁸⁾



6.3.5 福岡の式を用いた極值的流量の推定

- 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) 図6-3-2より、坂口らの1998年（平成10）洪水ピーク流量の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、河幅を侵食幅として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理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流量の試算を行った。その結果、余笹川の極値流量は1998年（平成10）洪水の1.3倍以上～2.2倍規模と推察した。

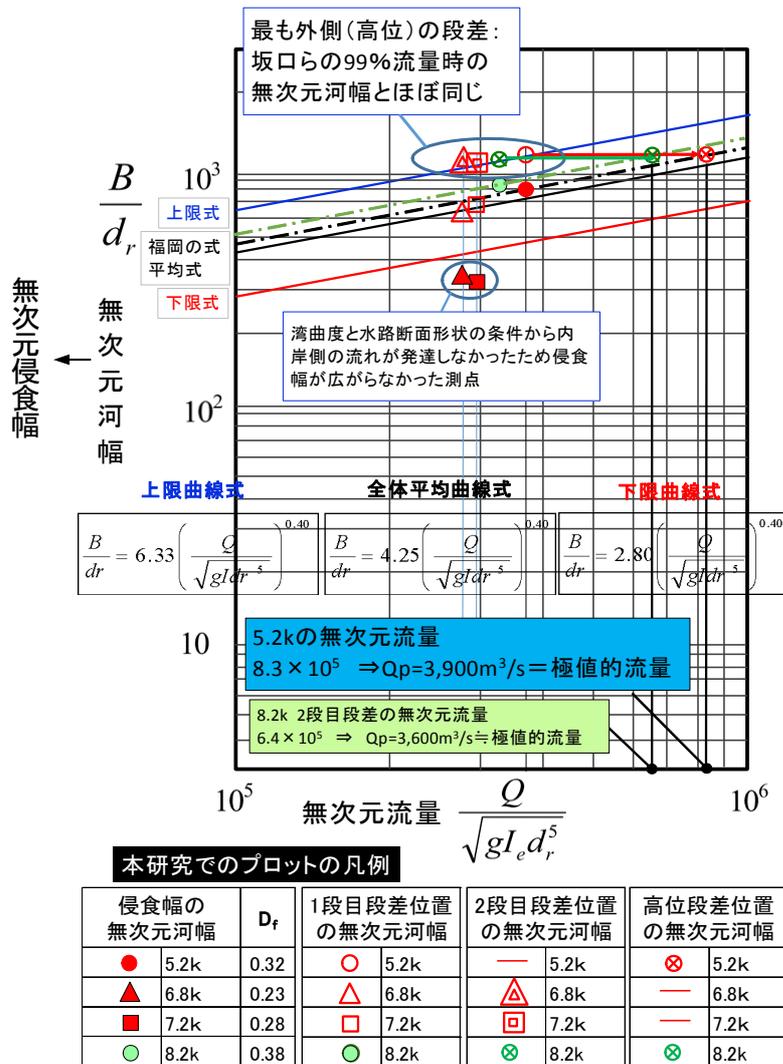


図 6-3-7 余笹川谷底侵食低地の測定結果を福岡の式にプロットした結果

6.3.6 1998年（平成10）洪水で側方侵食が大きくなかった箇所の極值的流量の考察

谷底低地を蛇行しながら谷底横断方向に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る。岡田ら⁹⁾は、複断面河道内の低水路の蛇行度及び相対水深を変化させた実験を行った。その結果、低水路幅/蛇行帯幅 <0.5 、蛇行度 <1.10 の条件で相対水深比 D_f （高水敷水深/低水路全水深）が0.3以下の場合には低水路の蛇行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ること、 D_f が0.3以上になると低水路と高水敷の間の流れの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し複断面的流れに変わることを報告している。

余笹川の外岸側の谷壁は50～40万年前の良く締まった黒礫岩層なだれで構成され耐侵食性は高いため、外岸寄りの流れが発達しても容易に侵食幅は広がらない。一方、内岸寄りの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、表6-3-1に示すように今回の4測線のうち、5.2kと8.2kの D_f が0.32、0.38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。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1998年（平成10）洪水ピーク流量の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（3.2.2参照）。ここでは側方侵食痕位置を河幅として福岡の式へ適用する。図6-3-7に4測線の無次元侵食幅をプロットした。これより、 D_f の値が小さく湾曲部の影響を強く受け単断面的流れで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結果となり、 D_f の値が0.3より大きく湾曲部をショートカットする直線的な流れで複断面的流れとなった5.2k、8.2k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。福岡の式への適合性が良い5.2k、8.2kでは、その関係曲線式を用いて高位の段差位置の河幅から極値流量を推定した。その結果は、前述のとおり $Q_p=3,600\sim 3,900\text{m}^3/\text{s}$ と1998年（平成10）洪水の2.0～2.2倍の流量規模であることが分かった。

一方、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ため侵食幅が広がらなかったと考えられる。しかし、この断面には段差が2段確認されている。この段差は、過去に湾曲部内岸側の流速が速くなる条件が存在したことを意味する。その条件は、相対水深比が0.3以上の複断面的流れの状態と考えられる。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、1998年洪水時の相対水深比は、 $D_f=0.19$ である（段差位置の水深1.1m/低水路水深5.7m）。 $D_f>0.3$ となるには、段差位置での水深が2m以上でなければならず、1998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1998年（平成10）洪水の約1.5倍（ $(4.3/3.4)^{5/3}$ ）の2,600 m^3/s 程度以上であったと推察される（図6-3-8参照）。

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。その結果、過去には1998年（平成10）洪水ピーク流量に対し1.5倍以上～2.2倍程度の極値流量が谷底低地（谷底平野）に流れた可能性を示すことが分かった。

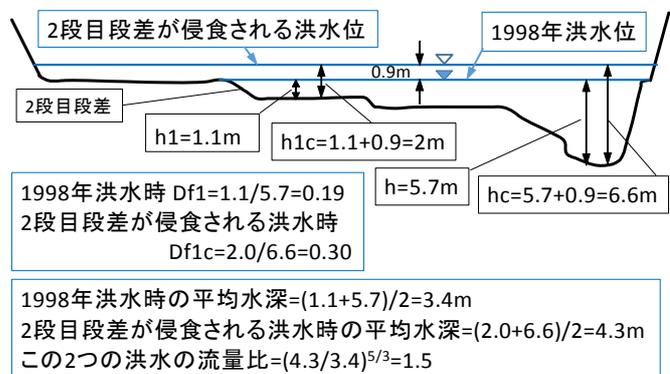


図 6-3-8 7.2k の高位段差が侵食される条件説明図

6.4 黒川の谷底侵食低地における極值的流量の推定

6.4.1 黒川検討断面の選定

本研究では、第3章で述べたように谷底侵食低地の侵食地形に着目する。

黒川の縦断面図を図6-4-1に示す。図4-2-1に示したように黒川には御富士山岩層なだれ堆積物は流入していないことから余笹川のような明瞭な谷底堆積低地は見当たらず、谷底侵食低地が長く続く。本研究の検討断面は、この谷底侵食低地で設定する。

また、余笹川同様に谷底部中心線が直線区間の箇所を選定することとする。谷底低地の土地利用は、ほとんどが耕作地であり、圃場整備などの地形改変により現在の段差位置は自然に形成された段差位置と異なる可能性がある。そこで、極力人工改変の影響を受けていない段差位置を把握する必要から昭和22年に米軍が撮影した空中写真判読により、河川縦断方向に連続した段差を明瞭に確認できる箇所を選定することとした。

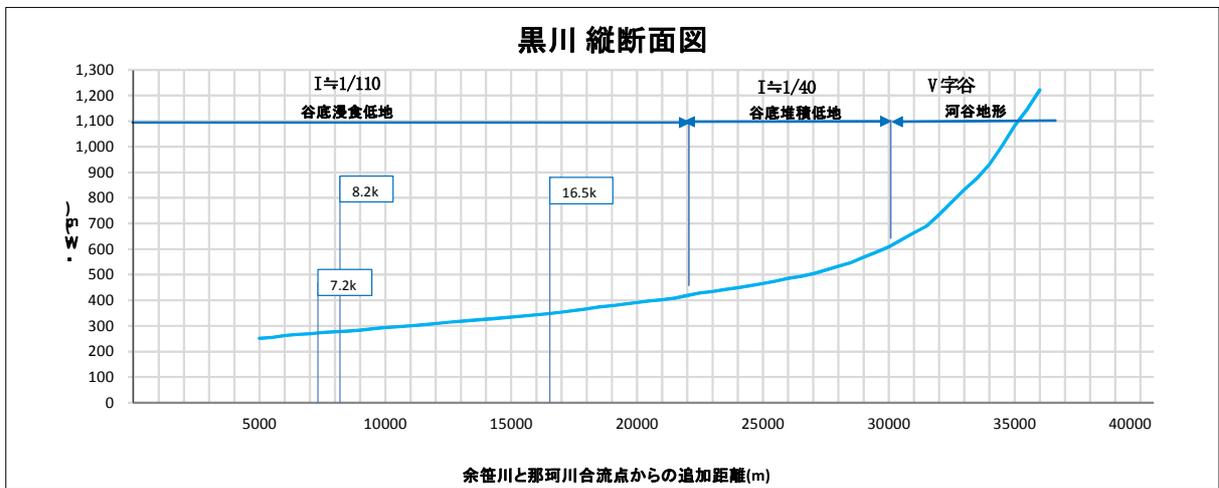


図6-4-1 余笹川合流点より上流の黒川河川縦断面図

黒川の検討断面は、下流から7.2k, 8.2k, 16.5kの3断面とする。

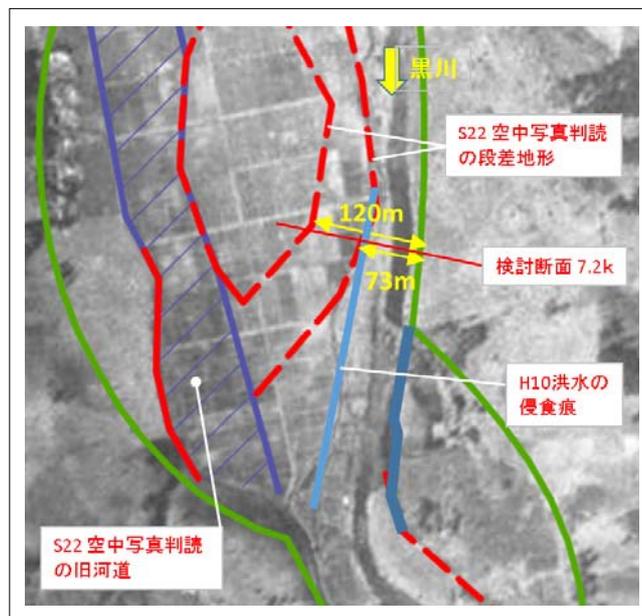


写真6-4-1 黒川7.2k昭和22年米軍撮影空中写真による段差位置確認

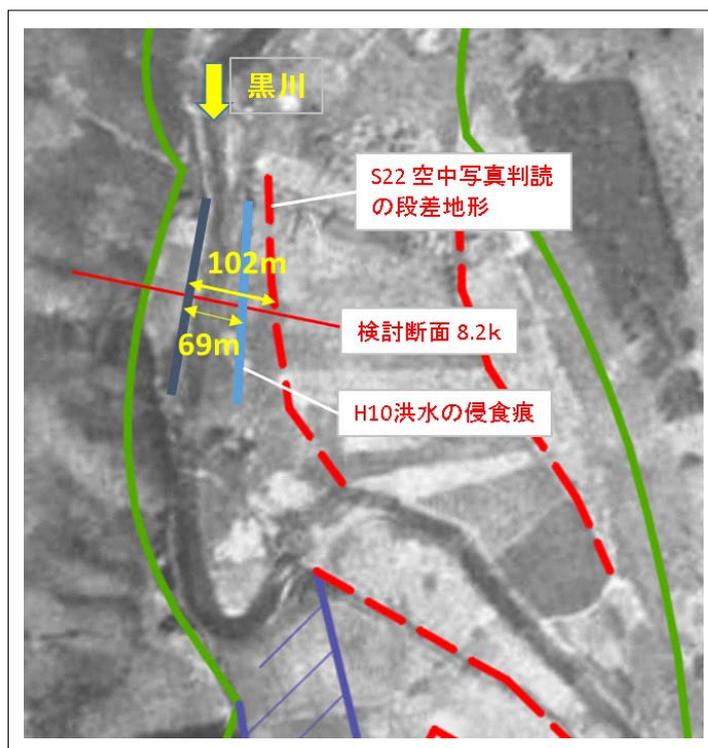


写真 6-4-2 黒川 8.2k 昭和 22 年米軍撮影空中写真による段差位置確認

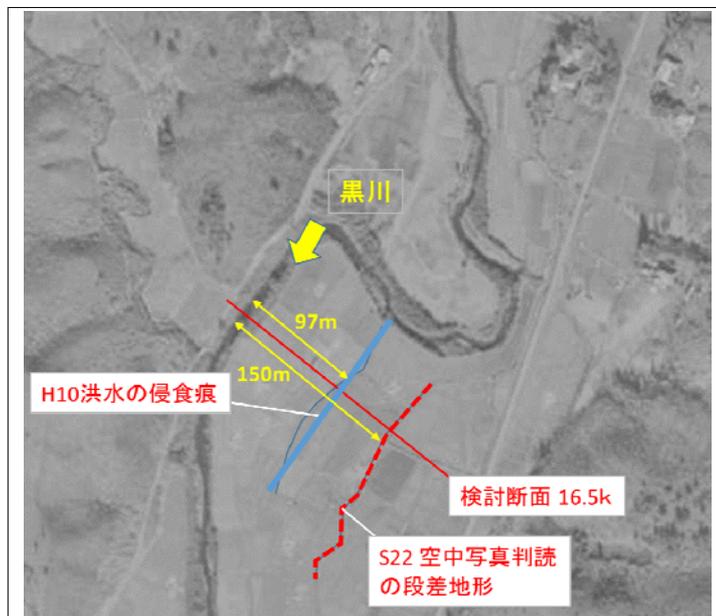


写真 6-4-3 黒川 16.5k 昭和 22 年米軍撮影空中写真による段差位置確認

6.4.2 調査結果の整理及び考察

7.2k, 8.2k, 16.5kの測線における地形・地質の調査結果を図6-4-2～6-4-4に示す。

放射性炭素年代測定の結果は、後述(7.3 余笹川及び黒川の放射性炭素年代測定からの谷底形成過程の考察)でまとめて記載し考察する。

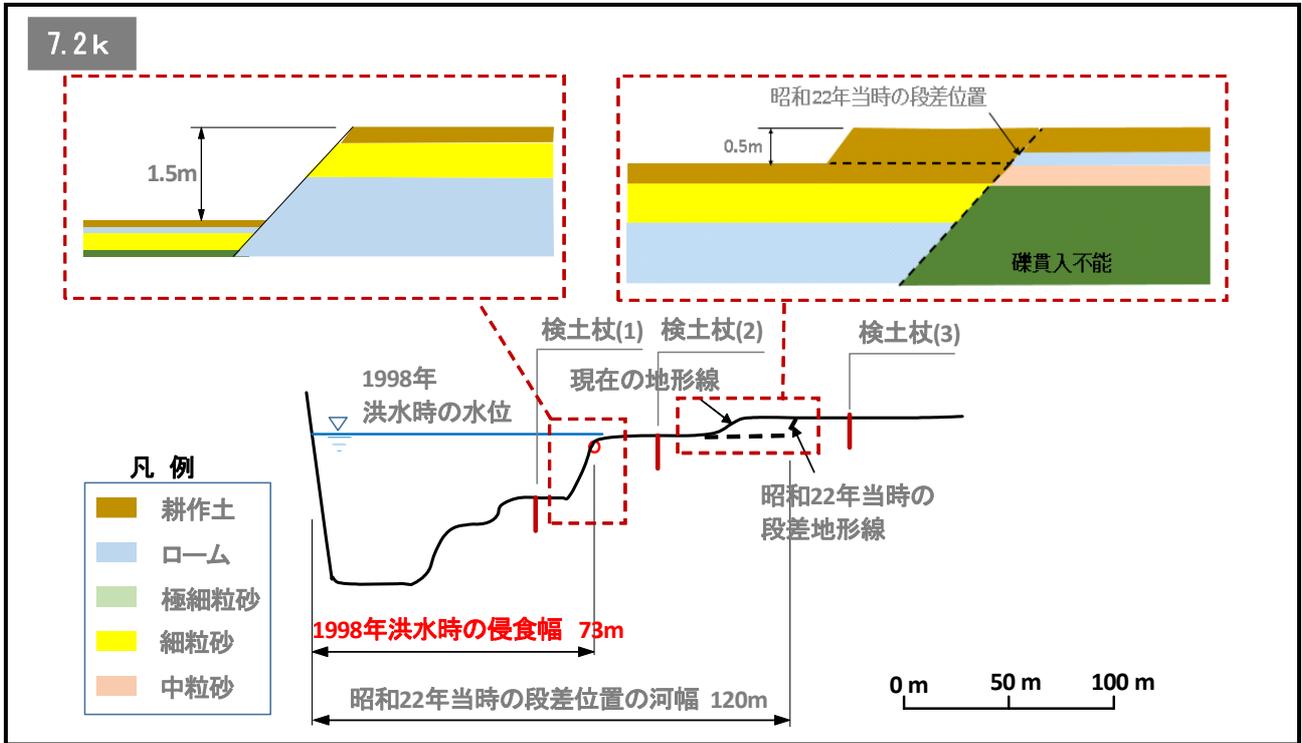


図6-4-2 黒川7.2k横断面図

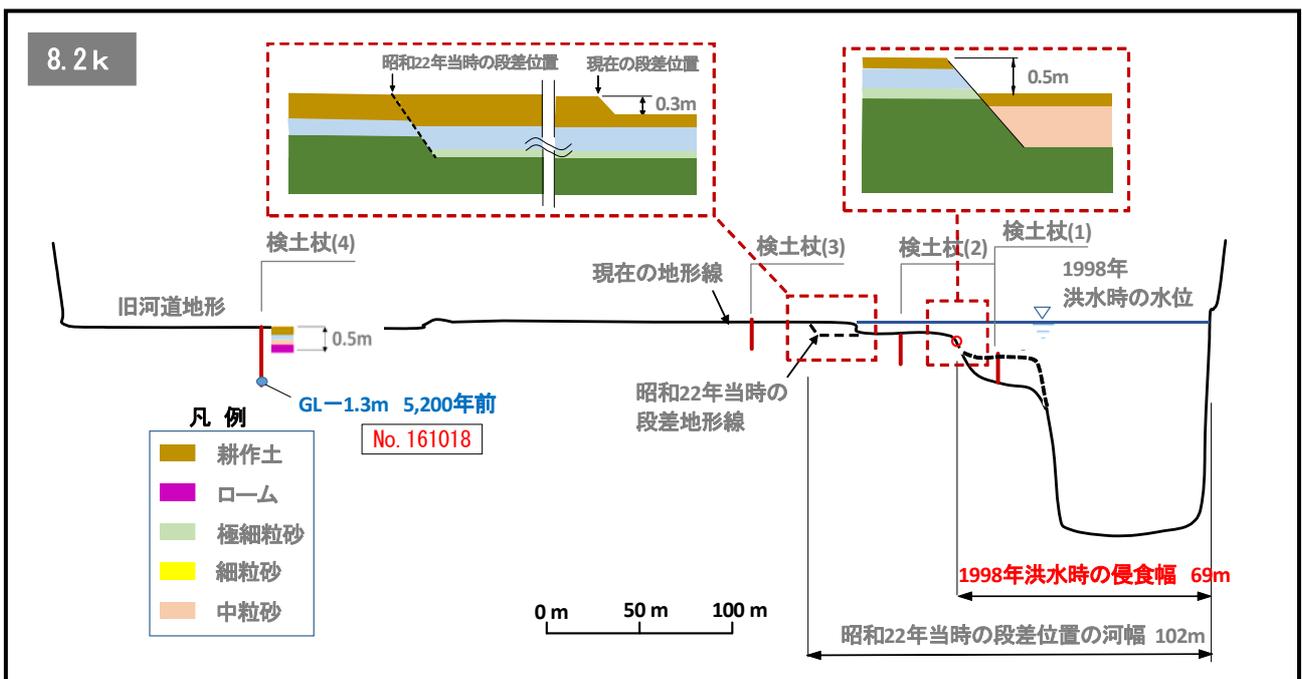


図6-4-3 黒川8.2k横断面図

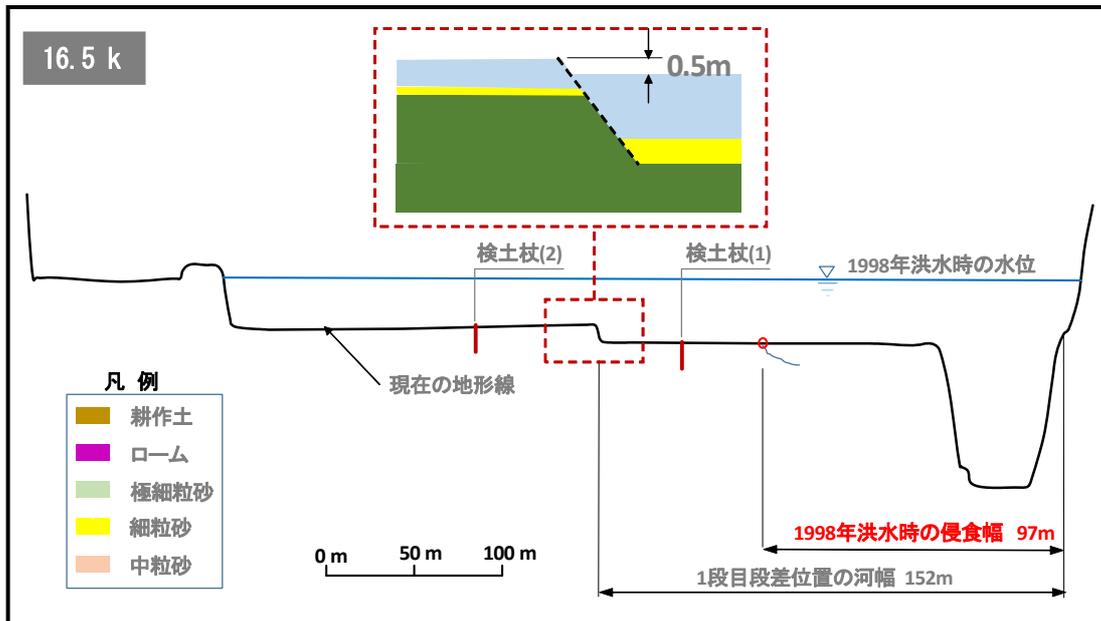


図 6-4-4 黒川 16.5k 横断面図

6.4.3 福岡の式を用いた極值的流量の推定

3 測線の 1998 年洪水時侵食幅とピーク流量 (表 5-6-2 を参照し, 16.5k は比流量換算で設定) を代表粒径 $d=0.2\text{m}$ (5.5 参照) を用いて無次元化した結果を表 6-4-1 に示す. さらに, 福岡の式によりプロットした結果を図 6-4-5 に示す.

表 6-4-1, 図 6-4-5 より以下のことが分かった.

- ① 福岡の式により, 1998 年 (平成 10) 洪水時の無次元侵食幅と無次元ピーク流量の関係をプロットした結果, 3 測線ともに福岡の式の適用範囲にプロットされた. 7.2k, 8.2k は下限式に近い位置であったが, 16.5k は平均式に近い位置であった.
- ② 黒川谷底侵食低地の極値流量は, 1998 年 (平成 10) 洪水ピーク流量の 2.7~3.5 倍程度と推定され, 比流量で $22\sim 29\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ である.
- ③ 余笹川谷底侵食低地の侵食幅から求めた極値流量は, 1998 年 (平成 10) 洪水ピーク流量の 2~2.2 倍程度, 比流量は $28\sim 31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ で黒川と概ね同程度であることから, 洪水規模も同規模であったと推察される.

表 6-4-1 黒川谷底侵食低地の測定結果および解析結果

| 距離標 | 流域面積 A(km ²) | 平成10年 洪水流量 Q(m ³ /s) | 水面 勾配 ¹⁾ Ie | 被災前 川幅 b(m) | 侵食幅 bmc(m) | 1段目 川幅 bfp1(m) | 無次元 流量 (H10) Q/(gId ⁵) ^{0.5} | 無次元 侵食幅 bmc/d | 無次元河 幅 (1段目) bfp1/d | 無次元流 量 (1段目) Q/(gId ⁵) ^{0.5} | 1段目河 幅形成 流量 Qp(m ³ /s) | Qp/Q | 比流量 Qp/A |
|-------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|----------------------|--|---------------------|------------------------------|--|--|------|-----------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | m ³ /s/km ² |
| 7.2k | 98 | 810 | 0.008 | 60 | 73 | 120 | 1.58E+05 | 365 | 600 | 5.49E+05 | 2.8E+03 | 3.46 | 28.64 |
| 8.2k | 98 | 810 | 0.008 | 50 | 69 | 102 | 1.65E+05 | 345 | 510 | 4.38E+05 | 2.2E+03 | 2.66 | 21.96 |
| 16.5k | 91 | 750 | 0.008 | 40 | 97 | 152 | 1.53E+05 | 485 | 760 | 4.69E+05 | 2.3E+03 | 3.07 | 25.33 |

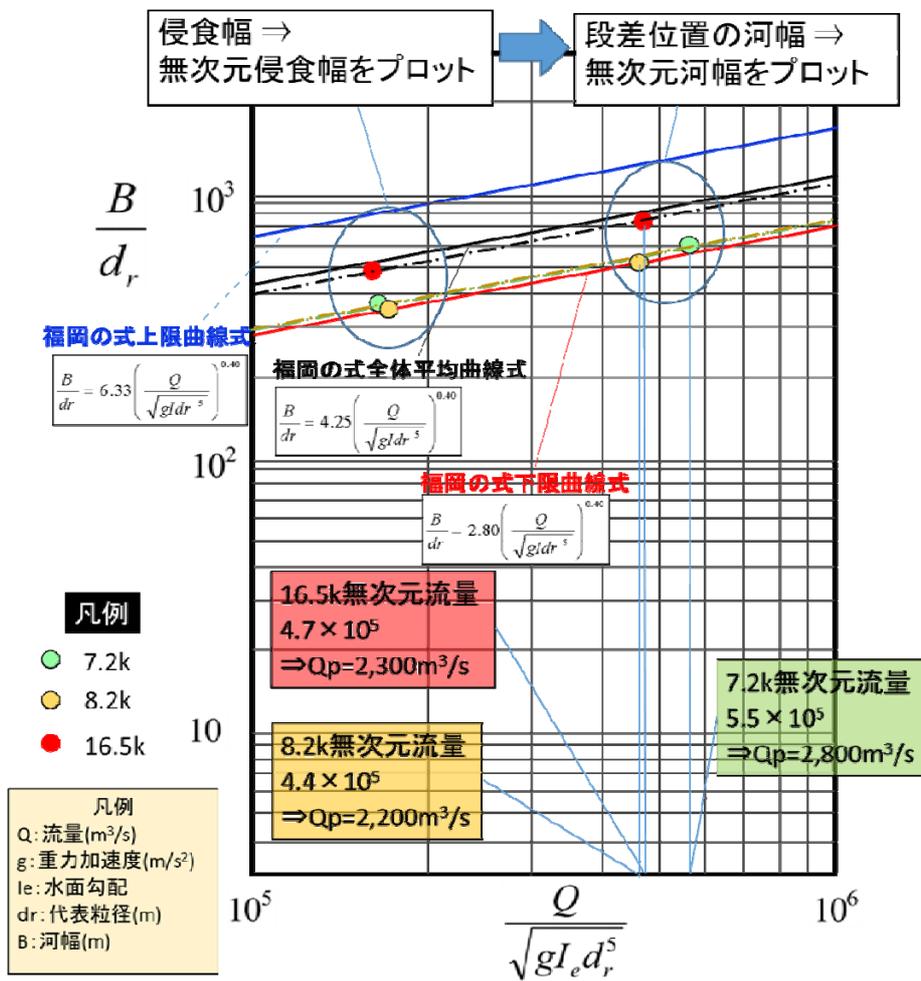


図 6-4-5 黒川谷底侵食低地の測定結果を福岡の式にプロットした結果

6.5 本章のまとめ

第3章に示した谷底侵食低地から極値流量を推定する方法を、1998年の大規模洪水で側方侵食が拡大した一級河川那珂川左支川の余笹川及び黒川において適用した。その結果を以下に述べる。

- ① 余笹川谷底侵食低地の谷底横断方向の段差を現在位置と昭和22年空中写真判読で確認された段差位置を対比した結果、一部異なる箇所はあるものの、概ね一致している。また、段差は河川縦断方向に比較的連続している。
- ② 谷底横断方向にみた場合、段差は1段若しくは2～3段を確認できる。段差の高低差は0.3m～1.2m。
- ③ 坂口らが設定した1998年（平成10）洪水ピーク流量の99%流量の水際線は、現在の高位の段差地形位置と概ね一致している。
- ④ 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流量を知ることの可能性を示した。
- ⑤ $Df > 0.3$ 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、河幅を侵食幅として無次元化することにより、「福岡の式」に適合することが分かった。
- ⑥ 谷底低地を流れる余笹川の水理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流量の試算を行った。その結果、余笹川の極値流量は1998年（平成10）洪水の1.5倍以上～2.2倍規模と推察した（比流量は $20 \sim 31 \text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）。
- ⑦ 余笹川と同様に黒川谷底侵食低地の極値流量を推定した。その結果、1998年（平成10）洪水ピーク流量の2.7～3.5倍程度と推定され、比流量で $22 \sim 29 \text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ に相当することが分かった。

【参考文献】

- 1) 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.
- 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：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.
- 4) 舘健一郎・末次忠司・小林裕明・都丸真人：洪水氾濫時の防災樹林帯の効果に関する検討 ―余笹川流域を対象として―，水工学論文集，第 45 巻，pp.913-918，2001.
- 5) 佐藤照子：1998 年 8 月那珂川水害の被害と土地環境，主要災害調査第 37 号 北関東・南東北地方 1998 年 8 月 26 日～ 31 日豪雨災害調査報告，防災科学技術研究所，pp.137-216，2001.
- 6) 栗山卓也・川口広司・末次忠司・日下部隆昭・最上谷吉則：平成 10 年余笹川洪水による国道 4 号橋梁上下流の河床変動と河岸侵食，水工学論文集，第 48 巻，pp.1087-1092，2004.
- 7) 上野鉄男：余笹川流域の 1998 年水害の発生構造について，自然災害科学，24-3，pp.303-321，2005
- 8) 坂口達哉：谷底平野を流れる河川の洪水時の流水幅と谷幅を形成する極値流量の推算，中央大学修士論文，2012.
- 9) 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.
- 10) 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，pp.1165-1170，2013.