

第7章 余笹川流域の極值的流量の検証

第6章では余笹川及び黒川の谷底侵食低地において段差地形から福岡の式を用いて極値流量を推定した。本章は、その値の確からしさを検証するために、余笹川の谷底堆積低地で極値流量の推定を試みる。余笹川及び黒川の谷底侵食低地における極値流量と本章での余笹川谷底堆積低地における極値流量を対比することにより妥当性を確認する。また、放射性炭素年代測定により過去の大規模洪水の上下流の整合性からも極値流量の妥当性を確認するとともに、余笹川及び黒川の形成過程を考察する。

7.1 余笹川の谷底堆積低地における極值的流量からの検証

第6章で谷底侵食低地において側方侵食地形と段差地形から極値流量を推定した。その値の確からしさを検証するために、他の地点において別の手法により極値流量を推定し、おおよそ（オーダー的に）相違がないか確認することとする。

ここでは、堆積が卓越する谷底堆積低地において極値流量を試算する。方法は、洪水氾濫堆積物の堆積層序・平面的な広がり（分布状況）と堆積土砂の無次元限界掃流力から検討する。

7.1.1 検討箇所の選定

余笹川谷底堆積区間で河川が氾濫した場合に、その範囲がある程度限定的な場所の方が、氾濫堆積物の広がり具合を確認する上で都合が良い。本研究では、東北自動車道が余笹川を横断する箇所の直上流(19.5k)を選定する。

この場所は、図7-1-1、写真7-1-1に示すように那須岳の岩層なだれ堆積物である流れ山と流れ山の間を余笹川が流れている。この地形は大規模洪水時においても流れ山に規制されて溢れることはないが、そこを通過した後は開けた谷底堆積低地となるため左右岸に氾濫しやすい地形である。その氾濫堆積物の層序と広がり状況を調査し過去の洪水規模の推定を試みることとする。

7.1.2 調査方法

大規模洪水によって、形成される堆積の痕跡は、洪水の規模によって大きさが異なることが予想される。「堆積物の厚さ」、「堆積物の広がり」などは、洪水の規模に比例して大きくなると考えられる。このような現象に着目し、河川周辺の氾濫堆積物の土質を調査することにより、洪水により土砂がどのように氾濫堆積し現地形を形成したかを把握することとした。この調査による洪水堆積物粒径マップにより、以下のことを考察できる。

洪水（氾濫した流れ）で運搬できなくなり堆積させた砂の粒径の移動限界掃流力の条件から氾濫した流れの水量を求め洪水規模を推定する。1998年（平成10）洪水（ピーク流量）時に氾濫堆積した砂の粒径と氾濫水深の実績値を参考に過去の洪水氾濫堆積物の砂の粒径の違いから過去に発生した洪水規模を推定する。

余笹川の堆積卓越区間の調査は以下の手順で行った。

(a) 関連情報の収集整理

被災前後及び昭和22年（米軍撮影）の空中写真、災害調査報告書、地元住民への聞き取り調査により、1998年（平成10）洪水の被災時の水位や侵食・堆積範囲などの情報を収集整理した。



写真 7-1-1 高速道路上流における1998年(平成10)洪水後の状況および本研究の調査区間

(b) 地形特性の把握

現在の微地形の計測、及び人工地形改変の影響が少ない過去（昭和22年米軍撮影）の空中写真判読を行い、1998年（平成10）洪水後の測量結果との重ね合わせにより、調査地点の横断面図・縦断面図にそれら情報を表記した。

(c) 地質特性の把握

余笹川の堆積卓越区間ではグリッドの交点、黒川の侵食卓越区間では谷底部の河道横断方向の段差ごとにおいて、それぞれ検土杖試験、ポータブルコーン貫入試験（コンペネ）を行い、地表から1～3m程度の堆積土砂の土質と締まり具合を調査した。

(d) 調査結果の考察

(a)～(c)の調査結果、及び洪水時の水理条件から1998年（平成10）洪水時の流況を再現しつつ、過去の大規模洪水流量の規模を推定した。

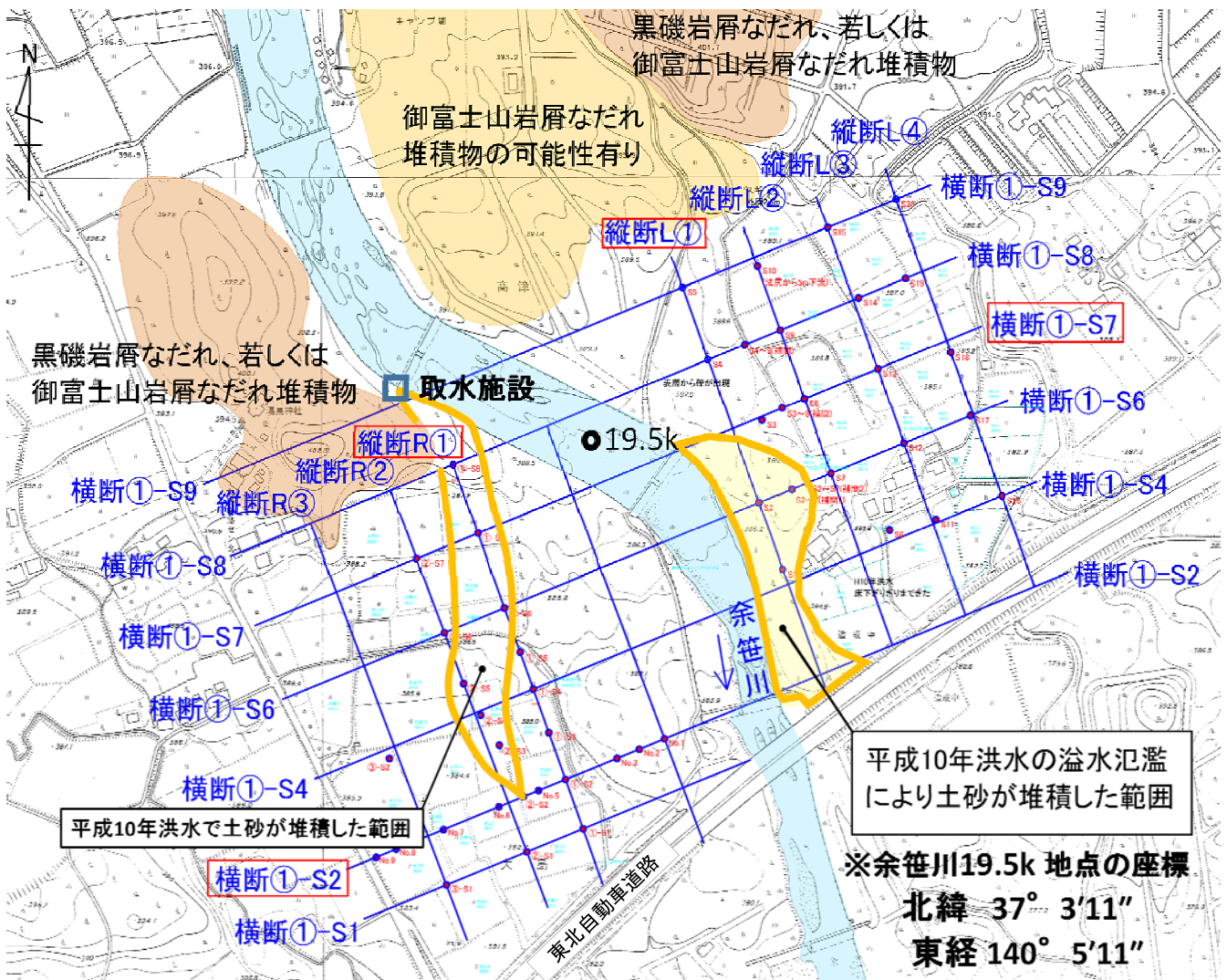


図 7-1-1 余笹川谷底堆積低地の調査地点およびグリッド設定

7.1.3 調査結果

検土杖で採取したサンプルはシルト～砂～礫であり、その多くは砂及びシルトで構成されていることが判明した。砂の粒度区分は地盤工学会の粒度区分により行い、現地では Grain Size Scale を用いて判別した。

余笹川 19.5 km地点では、1998 年（平成 10）の洪水時に土砂(砂)が氾濫堆積したとの情報が地元住民への聞き取り調査により得られた。このことから、当該箇所には洪水時の氾濫堆積物が何層も堆積している可能性が高い。ここでは、洪水時における堆積層序を以下のように仮定した。

- 1) 堆積する土砂は河岸付近で粗く、離れるに従い細くなるような粒度変化を起こす。
- 2) 堆積する土砂は鉛直(上)方向へ細くなるような粒度変化を起こす。
- 3) 鉛直(上)方向へ粗くなる場合、もしくは極端に粒径が変化する場合は堆積時期が異なると考える。

現地調査の結果、以下のことが分かった。

- ほぼ全箇所において、検土杖は1～2m程度貫入可能であり、ほぼ全箇所において、先端が砂礫にあたって貫入不能となった。余笹川河床部は、Φ50cm内外の巨礫が点在する礫主体の河床堆積物で構成されているものの左右岸の流路脇にはそれらの礫は確認されず、粗砂～シルトの細粒分が堆積しており、これらは大規模洪水時の氾濫堆積物と考えられる。
- 左右岸においていずれも5ユニット（5つの洪水氾濫堆積物と推定）を確認した。最も古い堆積物は、現況河床高と同じくらいか1m程度低い位置に分布する。
- 1998年（平成10）洪水の氾濫堆積物は、右岸側は取水施設から流入した土砂が氾濫したような痕跡結果となった。一方、左岸側は砂防流路工が整備されていたが河岸を溢水（一部破壊）する形態で氾濫堆積した。その氾濫堆積物は現在も杉林の中に残っており、コンペネにおいて非常にルーズな堆積物であること、検土杖により細砂であることを確認した。これらの氾濫堆積物の範囲は地元への聞き取りにより把握した（図7-1-1参照）。
- 図 7-1-1のグリッド交点で調査した結果をもとに氾濫堆積物の断面図を作成した。左右岸の縦断面図、主要横断面図を図7-1-2、7-1-3に示す。これより、左右岸ともに5つの氾濫ユニットと考えられる層序を確認した。そのユニットの堆積年代を把握する目的より、放射性炭素年代測定を図7-1-3に示す3箇所を実施した。それぞれの氾濫ユニットの氾濫堆積物の広がりを図 7-1-4～7-1-6 の平面図に示す。氾濫堆積物⑤の基底部では粗砂を確認した。5つの氾濫ユニットのうち、その厚さと堆積物の質（粗砂）より⑤の洪水規模が最大であったと推察される。

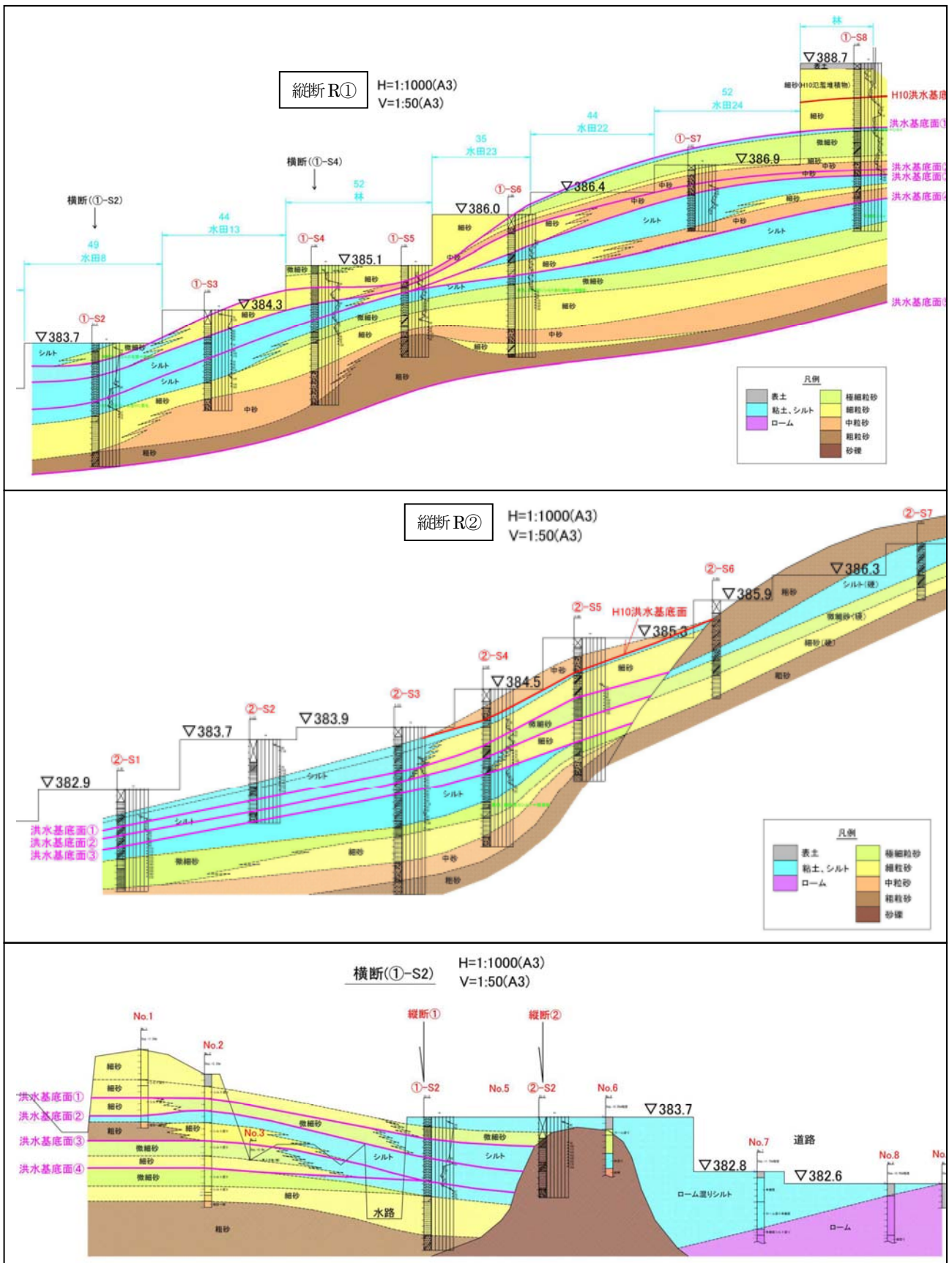


図 7-1-2 余笹川 19.5km 地点 右岸側氾濫堆積物の分布図(R①, R②, ①-S2)

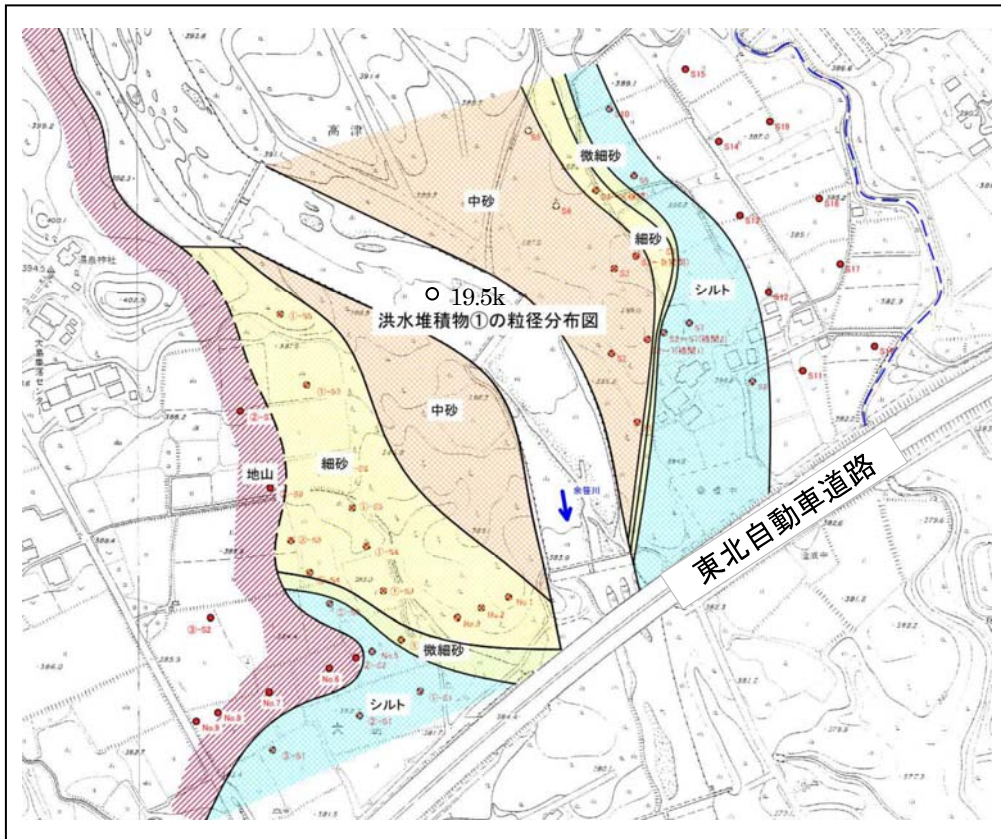
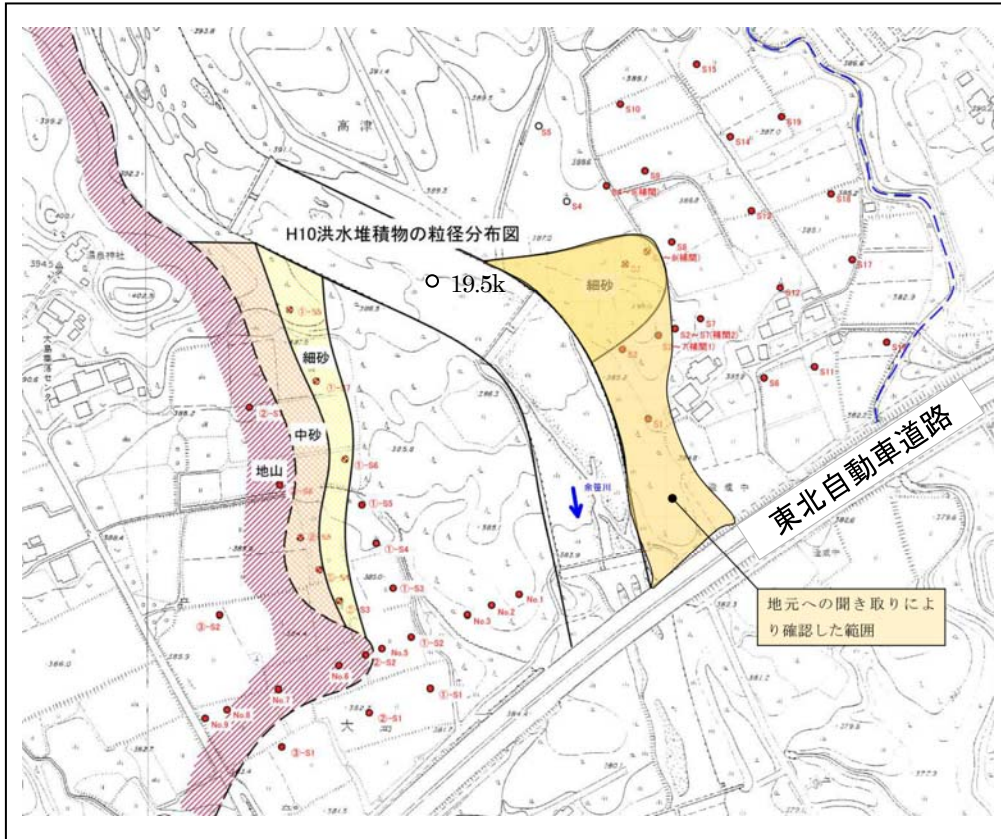


図 7-1-4 余笹川 19.5km 地点の氾濫堆積物①の左右岸平面分布
 上段：H10 氾濫堆積物，下段：①の基底面

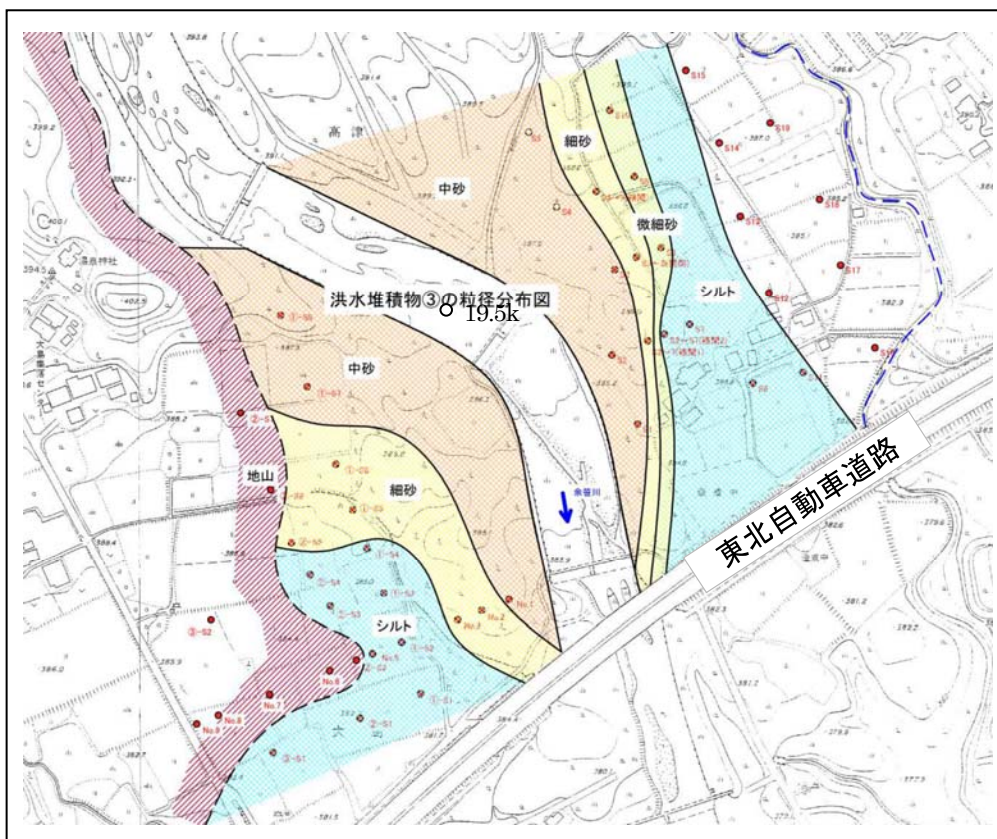
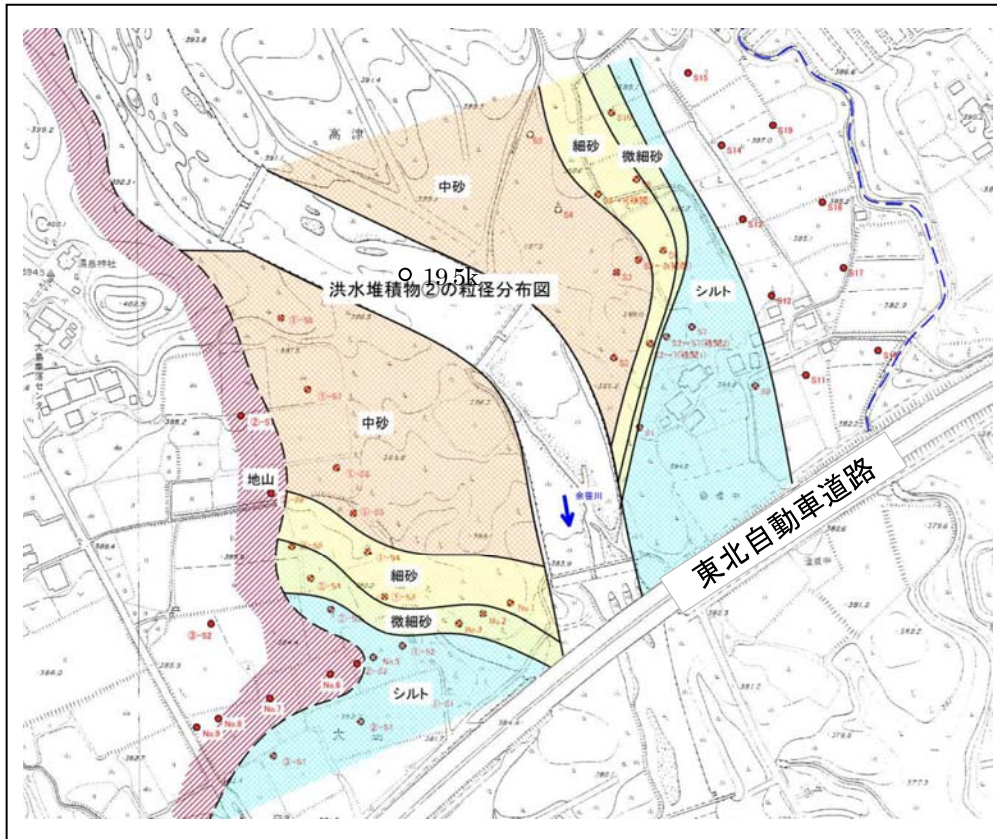


図 7-1-5 余笹川 19.5km 地点の氾濫堆積物②, ③の左右岸平面分布
 上段：②の基底面, 下段：③の基底面

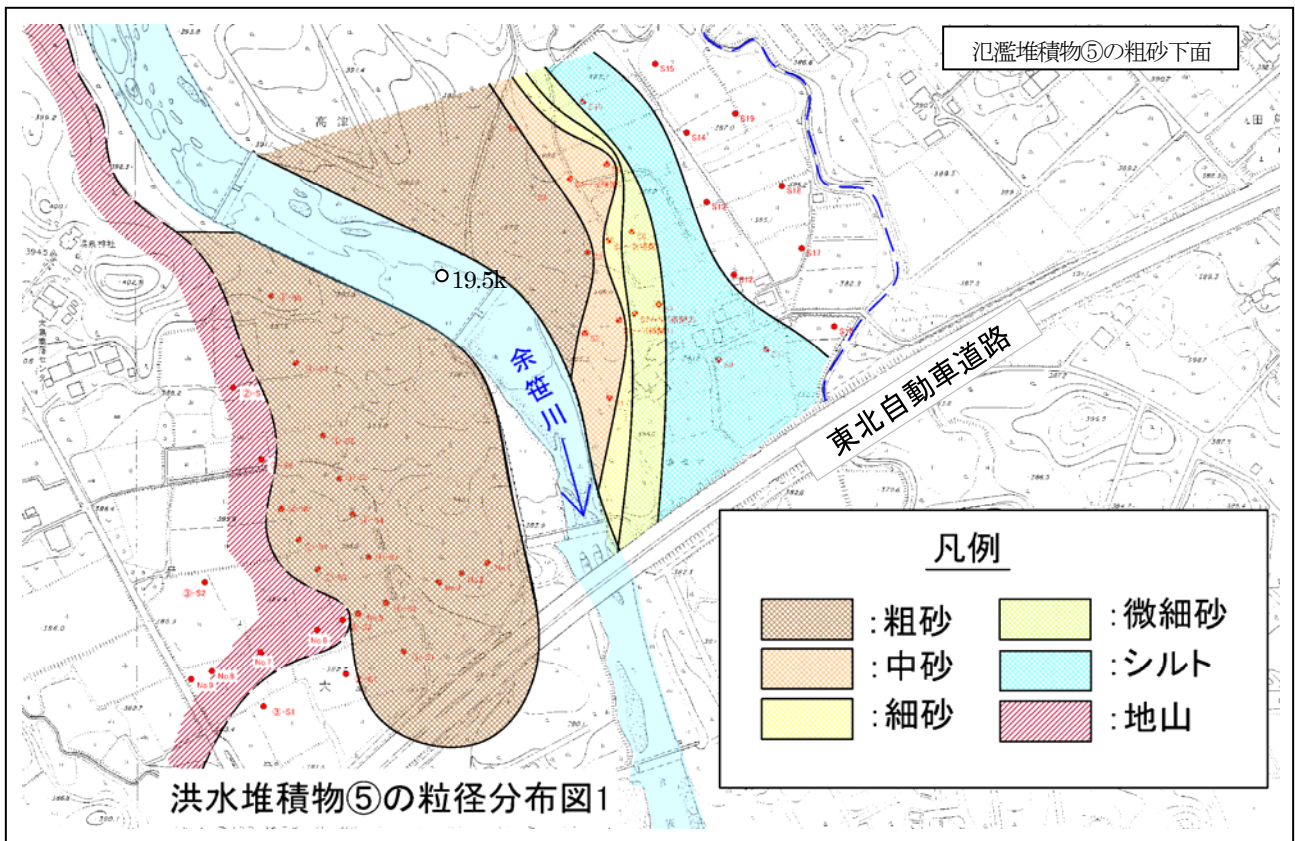
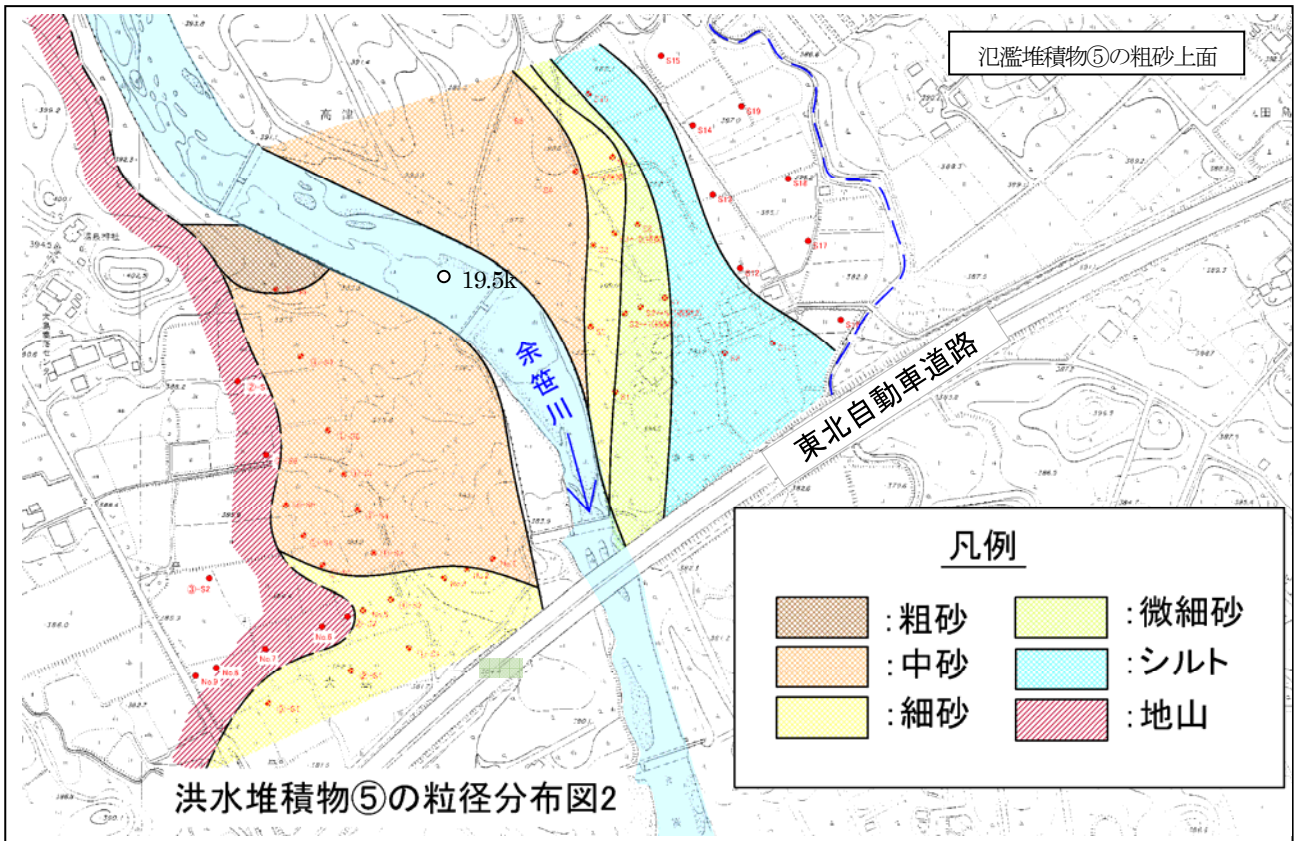


図 7-1-6 余笹川 19.5km 地点の氾濫堆積物⑤粗砂の上下面
 上段：氾濫堆積物⑤粗砂の上面，下段：氾濫堆積物⑤粗砂の下面

7.1.4 極值的流量の試算

平成10年の洪水時には、左岸側河岸を溢水した流れにより細砂が堆積した(図7-1-1参照)。そのときの氾濫水位は地元住民への聞き取りより、護岸天端高よりも0.5m高い水位であった(写真7-1-2の奥の杉林の中に1998年(平成10)洪水時の氾濫堆積物が写真7-1-3の場所で確認された)。

図-2に示す細砂が確認された場所では、かつての洪水の基底面⑤において粗砂が堆積していたことが今回の調査により明らかとなった(図7-1-2, 図7-1-3参照)。

これら氾濫堆積土砂の質(粒径)が異なることは、洪水規模が異なることを意味していると考えられる。

細砂と粗砂が堆積する環境の違いを摩擦速度と掃流力の関係式(1)、粒径別の無次元限界掃流力の関係式(2)で表し、1998年(平成10)洪水の実績値より粗砂が堆積した際の流量の推定を試みた。1998年(平成10)洪水の氾濫水深は0.5mであることから、細砂(表6-3-1より粒径0.25mm)の無次元限界掃流力(岩垣の式)と一致するエネルギー勾配を逆算すると $i=1/20,700$ と求まる。このエネルギー勾配を同一として粗砂(表6-3-1より粒径2mm)の無次元限界掃流力を一致させる平均水深は、 $H=2.95 \approx 3\text{m}$ と求まる。

$$\tau = \rho u_*^2 \quad \dots \dots (1)$$

$$u_* = \sqrt{ghi}$$

$$\left. \begin{aligned} 0.303 \leq d \Rightarrow u_{*c}^2 &= 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303 \Rightarrow u_{*c}^2 &= 134.6d^{31/22} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118 \Rightarrow u_{*c}^2 &= 55d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565 \Rightarrow u_{*c}^2 &= 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065 \Rightarrow u_{*c}^2 &= 226d \end{aligned} \right\} \dots \dots (2)$$

ここに、 τ : 掃流力(N/cm²)、 ρ : 水の密度(g/cm³)、 g : 重力加速度(cm/s²)、 h : 平均水深(cm)、 i : エネルギー勾配、 d : 粒径(cm)、 u_{*c} : 移動限界摩擦速度(cm/s)

細砂(粒径0.25mm)が堆積した際のエネルギー勾配は、

$$u_{*c}^2(\text{細砂}) = 8.41 \cdot 0.025^{11/32} = 2.366 \text{ cm}^2/\text{s}^2, \quad i = u_{*c}^2(\text{細砂}) / (g \cdot h) = 2.366 / (980 \cdot 50) = 1/20,700$$

粗砂(粒径2mm)が堆積した際のエネルギー勾配も同じと仮定すると、平均水深は、

$$u_{*c}^2(\text{粗砂}) = 134.6 \cdot 0.2^{31/22} = 13.936 \text{ cm}^2/\text{s}^2, \quad h = u_{*c}^2(\text{粗砂}) / (g \cdot i) = 13.936 / (980 \cdot 1/20,700) = 295\text{cm}$$

と求まる。

これより、粗砂が堆積する条件は、護岸天端の水深が3mの状態であり、河道内の水深で5.6mとなる。河道内の水深比は $5.6/3.1=1.8$ となり、マンギングの等流計算で流量比を求めると $1.8^{5/3}=2.7$ と求まる。すなわち、1998年(平成10)洪水流量の約2.7倍の流量が流下し、溢水氾濫した際に粗砂を堆積させたものと推定される。

この計算が成り立つ条件として、過去の洪水時も河岸高は写真7-1-2のように2.6m程度あり、河床勾配は現在と同程度($I \approx 1/60$)であったこと、また、河岸背後地は現在と同様に河畔林(林)に覆われていたことなどが挙げられるが、河岸高については流路工整備前の自然流路の河岸高が概ね2.6mであることは別紙7-1-1の既存資料により確認している。その他の仮定については推測の域を出ないものの、このような試算により過去の洪水流量

規模を推定することは、極値流量の推定法として十分意味のあることと考えている。

図 7-1-3 の過去の氾濫堆積物の広がり（堆積範囲）から洪水流量規模の推定精度を上げることも必要である。また、これら粗砂や中砂などの堆積状況（堆積範囲と堆積形状）は、河道形成流量が規定する堆積区間における河幅を解明する手掛かりになる可能性もあると考えている。

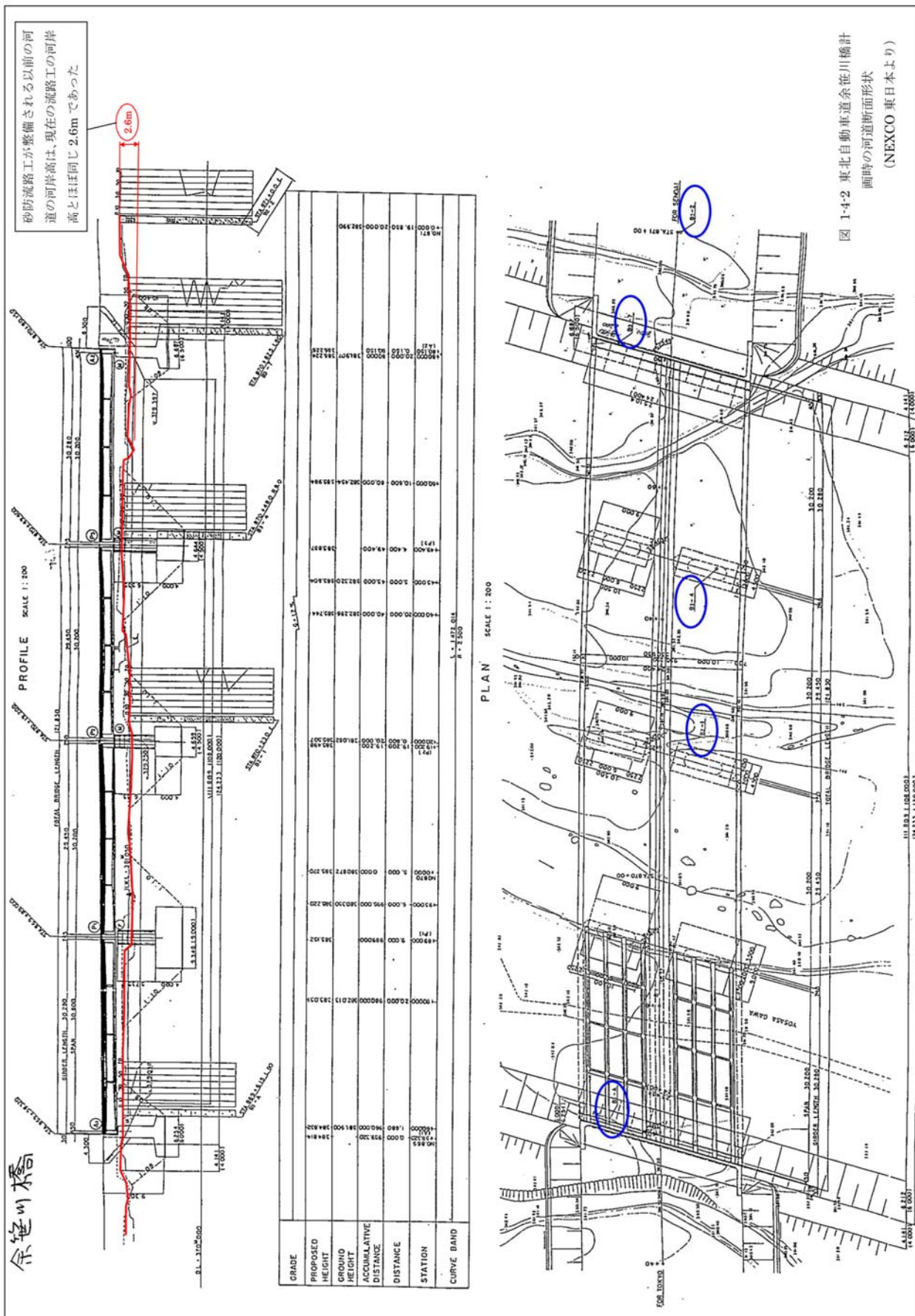


写真 7-1-2 余笹川 19.5k 左岸の平成 10 年洪水の痕跡 (聞き取りより)



写真 7-1-3 19.5k 左岸の杉林の中の細砂堆積箇所

別紙 7-1-1 余笹川の流路工が整備される前の自然河道形状



7.2 余笹川流域における極值的流量

余笹川谷底侵食低地において侵食幅から極値流量を推定し、その結果を余笹川谷底堆積低地、黒川谷底侵食低地の極値流量から検証した。以下に示す結果より、極値流量の比流量が概ね $q = 28\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 程度で同様な値であることから、その値は概ね妥当であると判断する。

表 7-2-1 余笹川流域の極値流量推定結果

	平成10年洪水 ピーク流量 $Q_0(\text{m}^3/\text{s})$	極値流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Q/Q_0	極値流量の 比流量 $q(\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2)$
余笹川 谷底侵食低地	1,740	3,600~3,900	2.0~2.2	28~31
余笹川 谷底堆積低地	400	1,080	2.7	28
黒川 谷底侵食低地	810	2,200~2,800	2.7~3.5	22~29

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

7.3.1 放射性炭素年代測定結果の整理

年代測定を実施する箇所は、余笹川の5.2km, 7.2 km, 19.5 km地点とした。5.2 kmと7.2 km地点が侵食の卓越する区間、19.5 kmが堆積の卓越する区間である。

侵食の卓越する区間では、高さの異なる段丘面で検土杖を実施し、貫入不能となる基盤上の土砂を採取した。一方、堆積の卓越する区間では、上方細粒化を示す1ユニットごとに土砂を採取した。その際、採取した土砂から有機物を抽出しなければならぬため、土砂は出来る限りシルト分が多く、層厚の厚いもの(必要なサンプル量を満足する程度)を対象とした。採取した土砂は水洗いと篩分けをすることで、その中から有機物を抽出し炭素(^{14}C)年代測定を実施した。

採取地点位置図を図7-3-1~7-3-4に、測定結果を表7-3-1, 7-3-2に示す。

5.2k

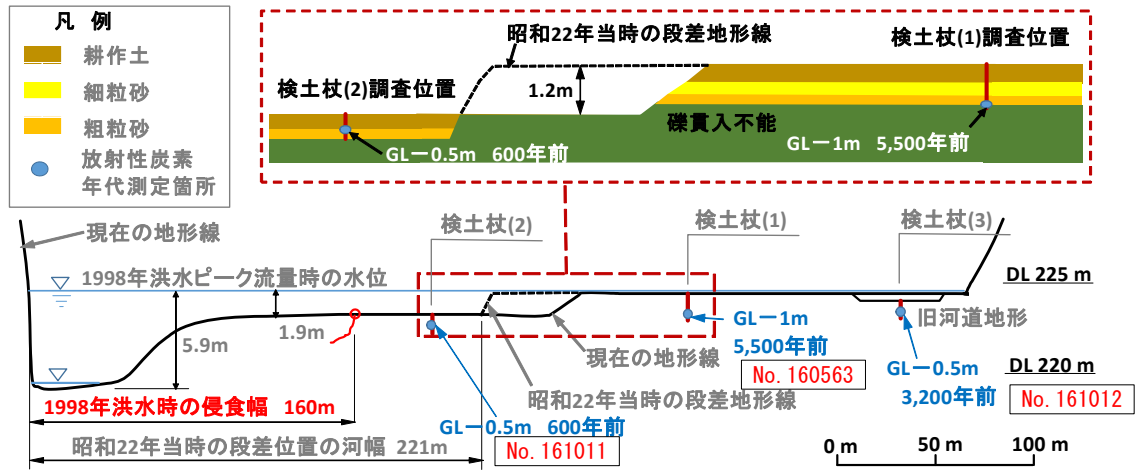


図 7-3-1 地形・地質調査結果 (余笹川 5.2k)

7.2k

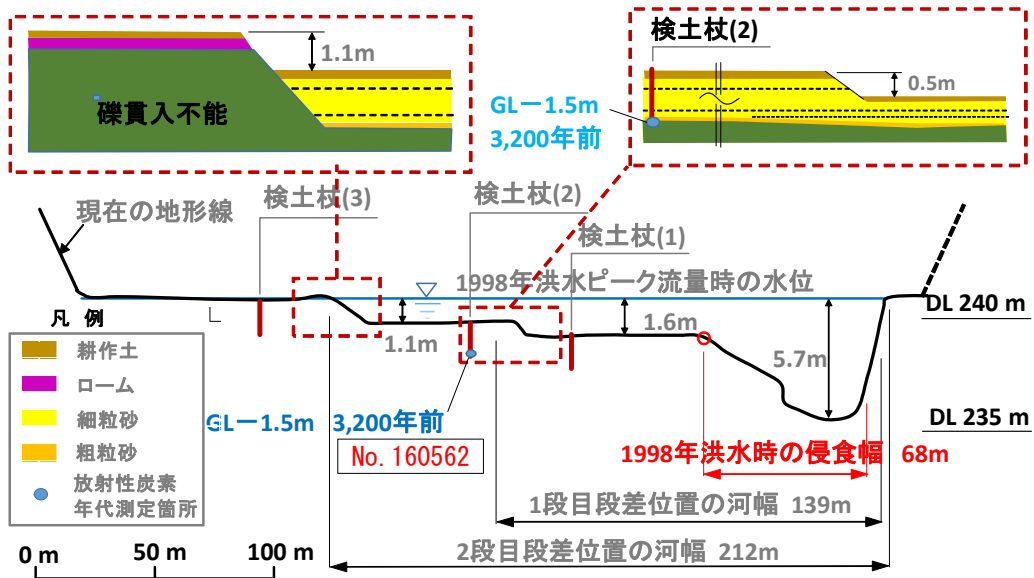


図 7-3-2 地形・地質調査結果 (余笹川 7.2k)

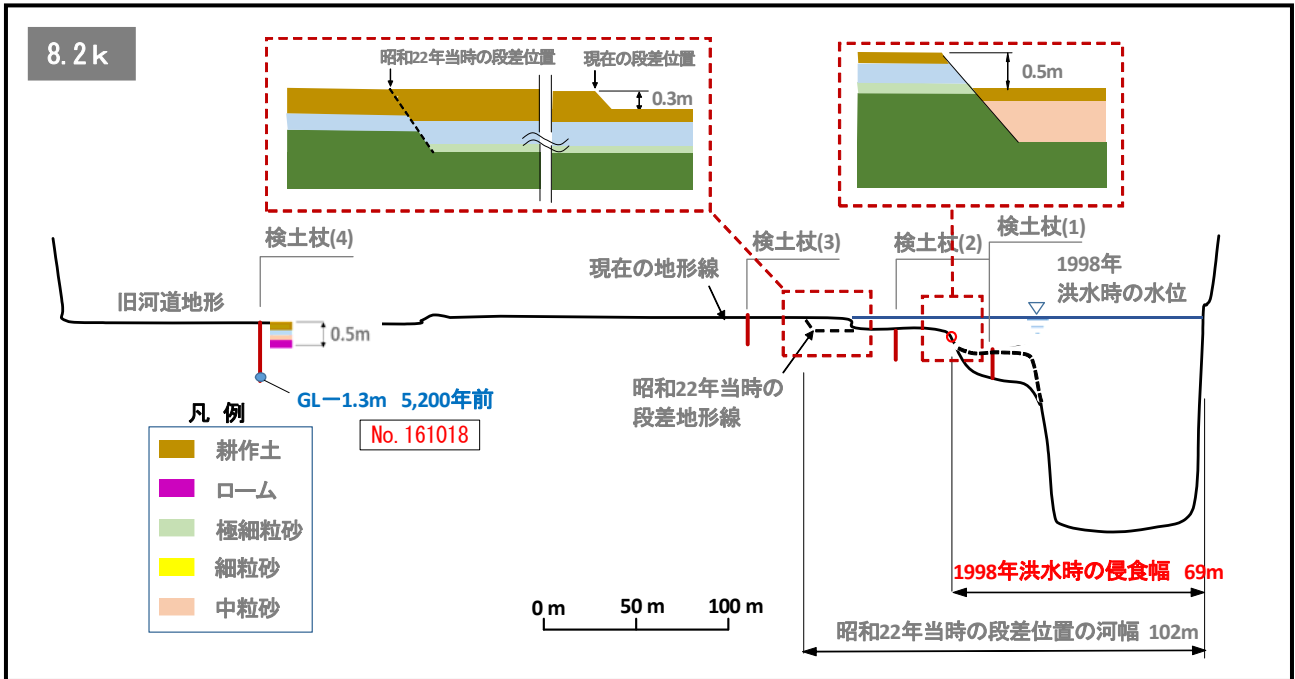


図 7-3-3 黒川 8.2k 横断面図

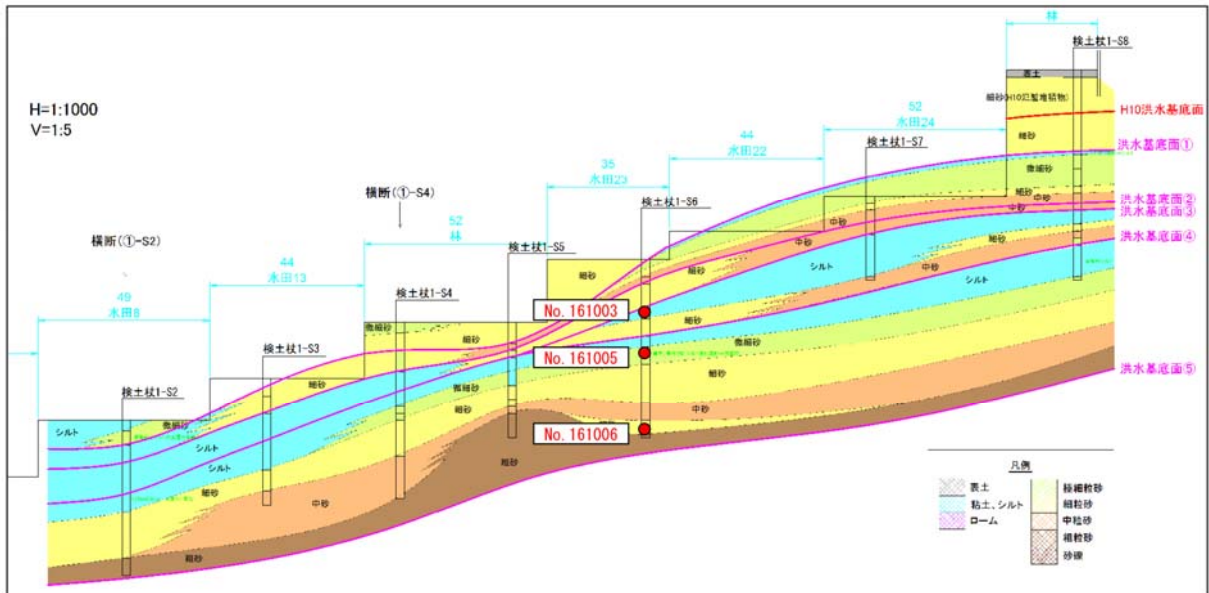


図 7-3-4 余笹川 19.5k 右岸 (①-S6)

表 7-3-1 余笹川における放射性炭素年代測定結果

河川名	左右岸	地点	測定番号	採取深度(m)	暦年較正用 (yrBP)	1σ暦年代範囲	2σ暦年代範囲
余笹川	右岸	5.2k (下段)	IAAA-161011	0.2 ~ 0.5	642 ± 22	657calBP-640calBP(25.4%) 590calBP-564calBP(42.8%)	665calBP-627calBP(39.9%) 604calBP-557calBP(55.5%)
余笹川	右岸	5.2k (上段)	IAAA-160563	1.0 ~ 1.2	4,816 ± 27	5596calBP-5580calBP(26.7%) 5511calBP-5486calBP(41.5%)	5603calBP-5575calBP(31.8%) 5545calBP-5476calBP(63.6%)
余笹川	右岸	5.2k (旧河道)	IAAA-161012	0.3 ~ 0.6	3,033 ± 23	3324calBP-3301calBP(15.4%) 3252calBP-3206calBP(40.5%) 3199calBP-3181calBP(12.3%)	3339calBP-3287calBP(26.8%) 3269calBP-3165calBP(68.6%)
余笹川	左岸	7.2k (下段)	IAAA-160562	1.05 ~ 1.5	2,985 ± 24	3210calBP-3141calBP(59.6%) 3092calBP-3081calBP(8.6%)	3229calBP-3073calBP(95.4%)
余笹川	右岸	19.5k (1-S6)	IAAA-161003	0.7 ~ 0.9	716 ± 20	678calBP-664calBP(68.2%)	687calBP-656calBP(95.4%)
余笹川	右岸	19.5k (1-S6)	IAAA-161005	1.4 ~ 1.6	3,477 ± 24	3825calBP-3791calBP(26.6%) 3770calBP-3745calBP(17.4%) 3731calBP-3699calBP(24.2%)	3832calBP-3690calBP(92.8%) 3659calBP-3650calBP(2.6%)
余笹川	右岸	19.5k (1-S6)	IAAA-161006	2.5 ~ 3.0	3,263 ± 24	3556calBP-3532calBP(21.1%) 3508calBP-3502calBP(3.8%) 3495calBP-3452calBP(43.3%)	3564calBP-3446calBP(93.3%) 3422calBP-3411calBP(2.1%)

表 7-3-2 黒川における放射性炭素年代測定結果

河川名	地点	測定番号	採取深度(m)	暦年較正用 (yrBP)	1σ暦年代範囲	2σ暦年代範囲
黒川	8.2k (上段)	IAAA-161018	1.2 ~ 1.45	5,215 ± 27	5590calBP-5961calBP(38.3%) 5954calBP-5930calBP(29.9%)	6094calBP-6087calBP(0.7%) 6004calBP-5912calBP(94.7%)
黒川	21.8k (下段)	IAAA-161017	0.95 ~ 1.2	4,780 ± 26	5585calBP-5578calBP(7.0%) 5535calBP-5480calBP(61.2%)	5590calBP-5567calBP(14.8%) 5560calBP-5470calBP(80.6%)

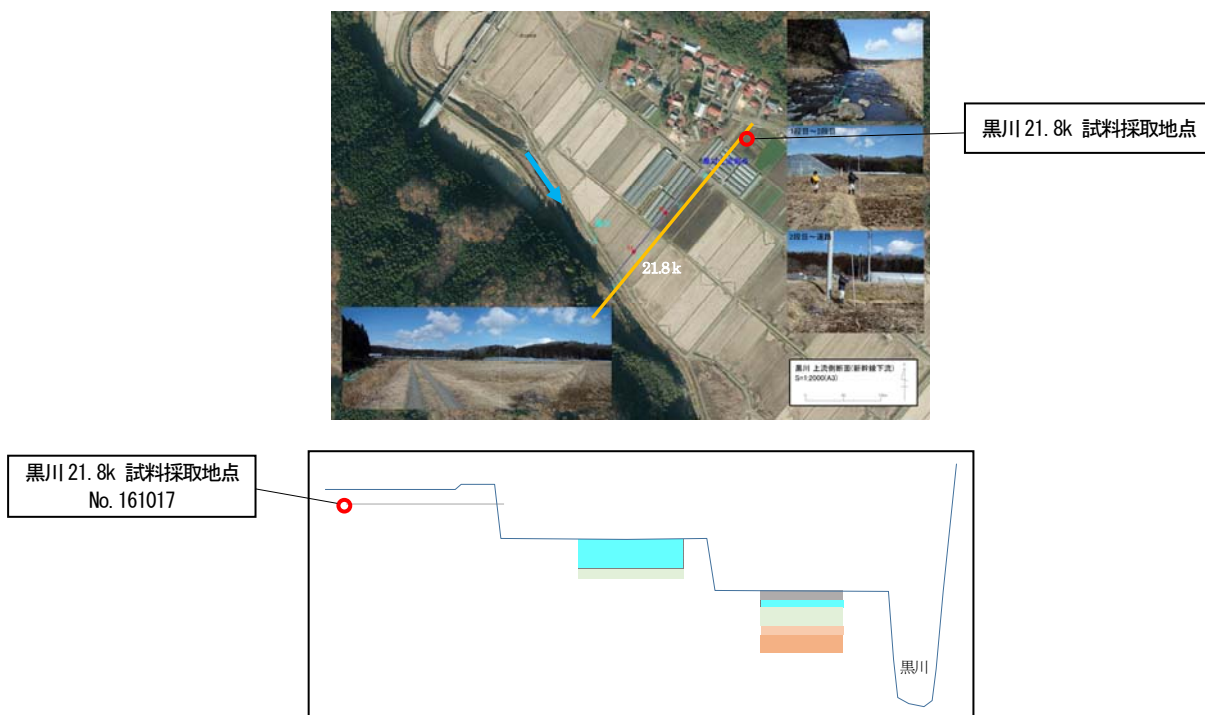


図 7-3-5 黒川 21.8k 試料採取地点位置図

7.3.2 洪水発生年代及び谷底低地形成過程の考察

(1) 余笹川における洪水発生年代の考察

① 余笹川 5.2 km地点における洪水発生年代

当該地点は、余笹川の侵食が卓越する区間であり、谷底低地には上下流方向へ連続する高さ約 1.2m の明瞭な段差が形成され、2 段の平坦な段丘面が形成されている。また、高位の段丘面には幅 20m 程度の僅かに窪んだ地形があり、旧河道であると判断される。そして、これら 3 つの地形を形成した地質の年代は、図 7-1-1 に示すような値が得られている。

地質学的解釈と放射性炭素年代測定結果より、以下のような地形の成り立ちが考察できる。

- 1) 高位の段丘面(余笹川の谷底低地)が大きく侵食されたのは 5,500~5,600 年前である。ただし、この年代の河道がどの位置にあったかは不明である。
- 2) 旧河道位置に最後に土砂が堆積したのは 3,200~3,300 年前である。この年代に大規模な洪水があり、旧河道位置まで氾濫土砂が到達した可能性がある。
- 3) 低位の段丘面が最後に大きく侵食されたのは 560~670 年前である。低位段丘は現在の余笹川に向かって段差が形成されていることから、この時代、河道は現在の位置に固定されていたと考えられる。

② 余笹川 7.2 km地点における洪水発生年代

当該地点は、余笹川の侵食が卓越する区間であり、谷底低地には上下流方向へ連続する高さ約 1.1m と高さ 0.5m の明瞭な段差が 2 段形成され、3 段の平坦な段丘面が形成されている。そして、これらの地形を形成した地質の年代は、図 7-1-2 に示すような値が得られている(低位の段丘面には採取できる土砂が少なく、年代測定は実施していない)。

地質学的解釈と放射性炭素年代測定結果より、以下のような地形の成り立ちが考察できる。

- 1) 中位の段丘面(余笹川の谷底低地)が大きく侵食されたのは 3,100~3,200 年前である。中位段丘は現在の余笹川に向かって段差が形成されていることから、この時代、河道は現在の位置に固定されていたと考えられる。
- 2) 低位の段丘面は、河道が現在の位置に固定されてからのものであるが、最後に大きく侵食された年代については不明である(堆積物がないため)。

③ 余笹川 19.5 km地点における洪水発生年代

当該地点は、余笹川の堆積が卓越する区間であり、高水敷には過去の氾濫堆積物が厚く堆積している。そして、この氾濫堆積物は上方細粒化を示す 5 つのユニットに区分することができることから、過去に 5 回の大規模洪水が発生した証拠と判断される。これらユニットを形成した地質の年代は、図 7-1-4 に示すような値が得られている(層厚が薄いもしくは、粒度が粗い土砂の年代測定は実施していない)。

地質学的解釈と放射性炭素年代測定結果より、以下のような地形の成り立ちが考察できる。

- 1) 当該地で最も層厚が厚く、粗粒な土砂を堆積した洪水⑤の年代は 3,400～3,600 年前もしくは、3,700～3,800 年前である^{※1}.
- 2) 洪水④の年代は、660～690 年前である。
- 3) 洪水①～③の年代は、層厚が薄く、かつ細粒分が少ないため、年代は不明である。

※1：この2試料は採取深度で1.5mほどの違いがある。試料は検土杖で採取しているため、異なる年代の有機物が混入する可能性を完全に排除できない。よって、この程度の年代は誤差の範囲として捉えてよいと判断される。

(2) 余笹川及び黒川の形成過程

余笹川及び黒川の年代測定の結果を表 7-3-3 に示す。

表 7-3-3 余笹川および黒川の年代測定の結果一覧

河川名, 測点	試料採取地点	堆積年代
余笹川 5.2k	高位段丘の地表から 1m	5,500～5,600 年前
余笹川 5.2k	低位段丘の地表から 0.5m	560～670 年前
余笹川 5.2k	旧河道内の地表から 0.5m	3,200～3,300 年前
余笹川 7.2k	中位段丘の地表から 1.5m	3,100～3,200 年前
余笹川 19.5k	地表から 0.8m の洪水④	660～690 年前
余笹川 19.5k	地表から 1.5m の洪水⑤	3,700～3,800 年前
余笹川 19.5k	地表から 2.8m の洪水⑤	3,400～3,600 年前
黒川 8.2k	高位段丘の地表から 1.3m	5,900～6,100 年前
黒川 21.8k	高位段丘の地表から 1.0m	5,500～5,600 年前

※ 文字の色は、同一時期に堆積したものと推察したことを意味する

表 7-3-3 に示すように、余笹川の上流と下流、余笹川と黒川といった異なる場所において、着色箇所ごとに概ね同一年代の堆積を確認することができた。これらの結果より、余笹川および黒川の形成過程を以下のように整理することができる。

余笹川の 5.2 km 地点における高位の段丘面、黒川の 8.2 km 地点及び 21.8 km 地点における高位段丘面から得られた 5,500～6,100 年前という年代は、余笹川及び黒川の谷底低地から得られた ¹⁴C 年代の中で最も古い年代を示す。これらはすべて侵食の卓越する区間で得られたものであり、谷底平野の原型はこの時代に形成されたものと考えられる。那須岳の山麓を流域とする 2 つの河川において、谷底平野の形成が 5,500～6,100 年前というほぼ同年代まで遡れるという事実は、河川の形成史にとって非常に興味深い事実である。

余笹川の 5.2 km 地点における旧河道から得られた 3,200～3,300 年前という年代は、大規模な洪水により旧河道位置(僅かな凹地)まで氾濫土砂が到達し堆積した時期を示していると考えられる。この土砂は耕作土の下 0.3～0.6m で採取したものであり、3,200～3,300 年前以降、旧河道位置まで氾濫土砂は到達していないことになる。一方、余笹川の 7.2 km 地点における中位の段丘面からは、3,100～3,200 年前という値が得られており、大規模な洪水により中位の段丘面を形成するような侵食が起きた時期を示していると考えられる。5.2 km 地点における旧河道位置に土砂が堆積した年代(3,200～3,300 年前)と、7.2 km 地点における侵食が起きた年代(3,100～3,200 年前)は、ほぼ同年代であり、3,100～3,300 年前頃に大規模な洪水があった可能と考えられる。

余笹川の19.5 km地点では、氾濫堆積物の年代が直接得られている。確認された堆積物の中で最も規模が大きいと推定される洪水⑤が発生した年代(堆積した年代)は3,400~3,800年前であり、5.2 km地点における旧河道が放棄された年代(3,200~3,300年前)、7.2 km地点における中位の段丘面が形成された年代(3,100~3,300年前)とほぼ同年代であり、3,300~3,400年前頃に極値流量を示す大規模な洪水があった可能性が考えられる。

また、洪水④の年代が660~690年前というのは、5.2 km地点における低位段丘が形成された年代(560~670年前)とほぼ同年代であり、660~670年前頃に大規模な洪水があったと考えられる。

以上を整理すると、余笹川及び黒川の形成過程は以下の通りとなる。

① 5,500~6,100 年前

余笹川及び黒川の谷底低地で遡ることのできる最古の年代。谷底低地の原型が形成された時代と考えられる。谷底平野の高位段丘の形成された年代であり、洪水に関する間接的証拠ではない。

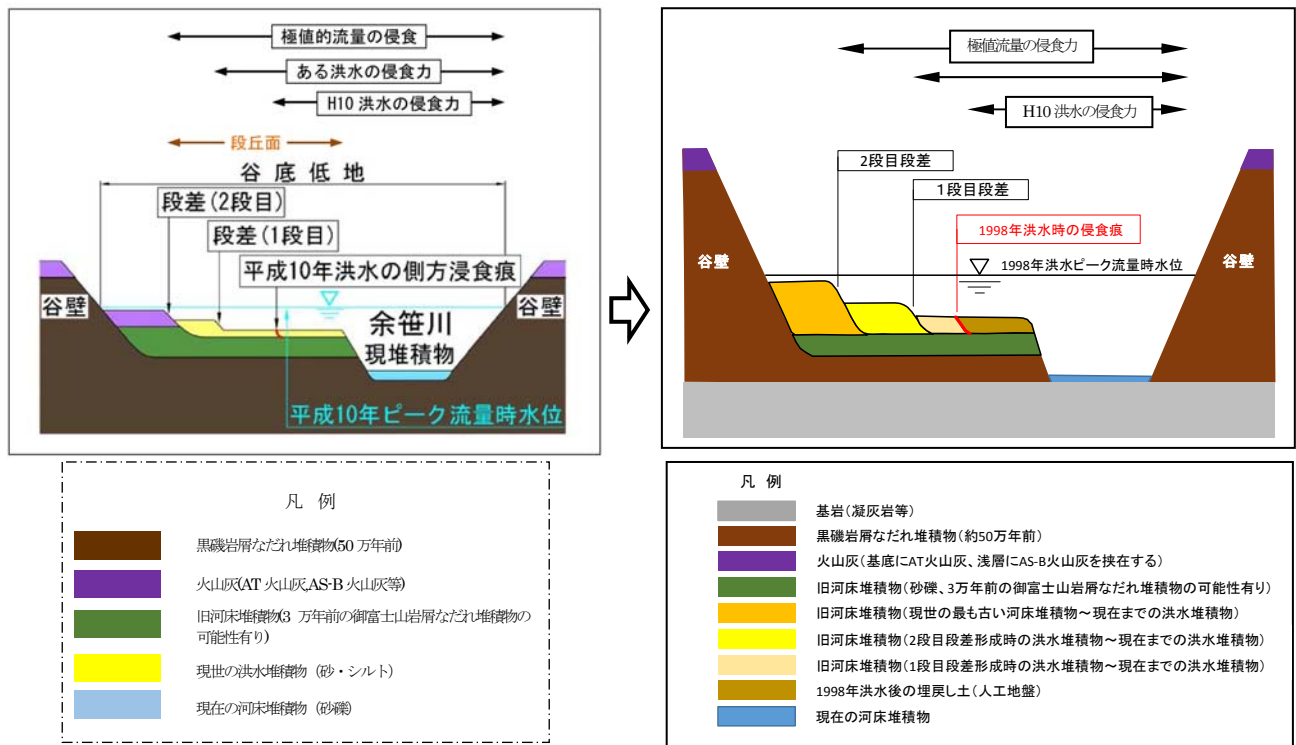
② 3,300~3,400 年前

余笹川の中位段丘を形成し、極めて多量の氾濫堆積物を堆積させた時代。侵食地形、堆積した土砂から推定して、余笹川で最も規模の大きい洪水(極値流量)が発生した時代と考えられる。

③ 660~670 年前

余笹川の低位段丘を形成し、比較的多量の氾濫堆積物を堆積させた時代。侵食地形、堆積した土砂から推定して、余笹川で比較規模の大きい洪水が発生した時代と考えられる。

これらの形成過程より、当初想定していた図3-1-7の地質断面模式図は、図7-3-6のように表すことができる。



当初想定した地質断面模式図(図3-1-7)

図7-3-6 本研究で明らかとなった地質断面模式図

7.4 本章のまとめ

第6章で推定した、余笹川及び黒川の谷底侵食低地における極値流量の確からしさを検証するために、余笹川中流域の谷底堆積低地の堆積層序と1998年(平成10)洪水時の氾濫実績を踏まえて極値流量の推定を行い比流量により対比を行った。また、余笹川・黒川の谷底侵食低地、および余笹川の谷底堆積低地の要所における放射性炭素年代測定結果を総合的に考察し、余笹川谷底侵食低地の形成過程を考察するとともに、過去の大規模洪水の規模と年代を推察した。結果を以下に述べる。

- ① 余笹川中流域の19.5k地点は、那須岳の岩屑なだれ堆積物である流れ山と流れ山の間を余笹川が流れている。この地形は大規模洪水時においても流れ山に規制されて溢れることはないが、そこを通過した後は開けた谷底堆積低地となるため左右岸に氾濫しやすい地形である。その氾濫堆積物の層序と広がり状況を調査し過去の洪水規模の推定を試みた。
- ② 余笹川河床部は、Φ50cm内外の巨礫が点在する礫主体の河床堆積物で構成されているものの左右岸の流路脇にはそれらの礫は確認されず、粗砂～シルトの細粒分が堆積しており、これらは大規模洪水時の氾濫堆積物と考えられる。
- ③ 左右岸において、いずれも5ユニット(5つの洪水氾濫堆積物と推定)を確認した。5つの氾濫ユニットのうち、その厚さと堆積物の質(粗砂)より⑤の洪水規模が最大であったと推察される。
- ④ 1998年(平成10)洪水の氾濫堆積物は、右岸側は取水施設から流入した土砂が氾濫したような痕跡結果となった。一方、左岸側は砂防流路工が整備されていたが河岸を溢水(一部破壊)する形態で氾濫堆積した。その氾濫堆積物は現在も杉林の中に残っており、コンペネにおいて非常にルーズな堆積物であること、検土杖により細砂であることを確認した。
- ⑤ 1998年(平成10)洪水の氾濫堆積物の堆積条件に準じて氾濫堆積物⑤の粗砂の堆積条件を再現した結果、護岸天端の水深で3mの洪水規模と推定され、1998年(平成10)洪水流量の約2.7倍の流量が流下し溢水氾濫したものと推定された。その洪水流量は、比流量換算で $q=28\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ である。
- ⑥ 余笹川谷底侵食低地において侵食幅から極値流量を推定し、その結果を余笹川谷底堆積低地、黒川谷底侵食低地の極値流量から検証した結果、比流量が概ね $q=28\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 程度で同様な値となった。これより、余笹川谷底侵食低地の侵食幅から推定した極値流量はおおむね妥当な値と判断した。
- ⑦ 余笹川谷底侵食低地の1～2段の段差地形の各段差、旧河道地形内部、谷底堆積低地の主要洪水氾濫堆積物を対象に放射性炭素法年代測定を行った結果、上下流の関連性から以下のことが分かった。
 - 5,500～6,100年前：余笹川及び黒川の谷底低地の原型が形成された時代と考えられる。
 - 3,300～3,400年前：余笹川の中位段丘が形成され、堆積卓越区間では極めて多量の氾濫堆積物を堆積させた時代であり、余笹川で極値流量が発生した時代と考えられる。
 - 660～670年前：余笹川の低位段丘を形成し、余笹川で比較的規模の大きい洪水が発生した時代と考えられる。

第8章 余笹川流域の極值的流量と他の統計的手法との対比

8.1 余笹川1998年豪雨の確率規模

余笹川における1998年豪雨の降雨確率は、栃木県資料¹⁾を参考にする。以下にその抜粋を示す。

余笹川災害復旧事業における基準点は、余笹川流末に位置する川田橋地点 (C. A. =343.5km²) とする。

計画雨量は、観測所雨量をティーセン法により算出した基準点上流の流域平均雨量 (2日雨量) 資料から年最大値を抽出し、これをデータとして確率処理を行う (なお、1998年豪雨時の降雨データは棄却検定を行ったうえで、統計処理データから棄却する)。

2日雨量のティーセン係数は、表8-1-1に示す通りである。

表 8-1-1 余笹川の平均雨量算出のためのティーセン係数

	(気)大田原	(気)那須	(気)黒羽	(気)八溝	(建)黒田原	計
明治34年～昭和15年	1.000					1.000
昭和16年～昭和29年		0.708	0.292			1.000
昭和30年～昭和33年		0.350		0.118	0.532	1.000
昭和34年～昭和37年		0.310			0.690	1.000
昭和38年～平成8年		0.350		0.118	0.532	1.000

確率雨量は水文統計ユーティリティ ((一財) 国土技術研究センター) を用いて算出し、確率処理は次に示す方法により行った。

- ・ Gumbel 法
- ・ SqrtEt 法
- ・ Gev 法

結果を表8-1-2、図8-1-1に示す。基準点における流域平均2日雨量は最大だった26日9時～28日9時までの565mmであった。これら確率処理との対比より、1998年豪雨の降雨確率は、いずれの手法においても1/400以上の確率評価となる。

表 8-1-2 確率計算結果 (余笹川川田橋)

確率年	Gumbel 法	SqrtEt 法	Gev 法
1/400	350.2	413.7	481.6
1/200	321.4	367.3	410.6
1/150	309.4	348.8	383.9
1/100	292.5	323.4	348.6
1/80	283.2	309.8	330.4
1/50	263.5	282.0	294.5
SLSC (99%)	0.105	0.055	0.038

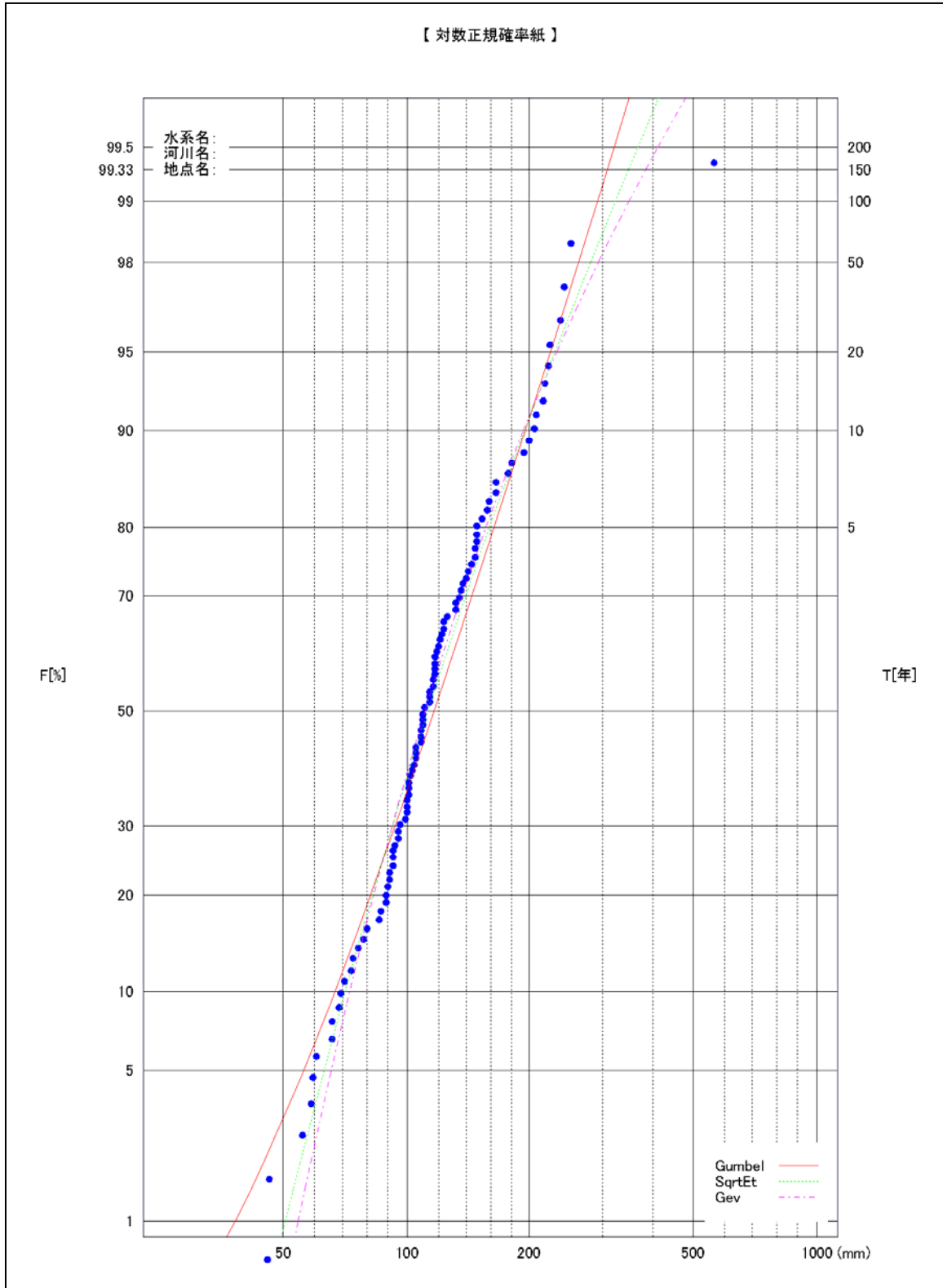


図 8-1-1 対数正規確率紙へのプロット結果

このような再現期間の異常性については、藤部²⁾が紹介し葛葉³⁾が指摘している。葛葉は、高々100年強のサンプルの中に、再現期間1,000年以上の観測値が混入することはないと考え、確率密度関数のすそ(tail)が厚いLévy分布を適用することにより、今までに記録された非常に大きい日降水量の再現期間を小さく抑えられる場合があることを示している。また、確率密度関数は1本の数式(近似曲線)で表現されているが、自然現象は同一の確率規模においても幅を持った再現性があるとも考えられている。

本章では余笹川における極値流量の再現確率を検討するものであるが、現行の確率評価手法では1998年(平成10)豪雨の降雨再現が異常な値を示しているため、極値流量の再現確率を適切に評価することは難しいのが現状である。1998年豪雨の再現期間の評価についても通常の変率密度関数では説明がつかない可能性があり、今後の課題とする。

8.2 全国の比流量との対比

前章までの検討により、本研究における余笹川流域の極値流量は、表8-2-1に示すように1998年(平成10)洪水ピーク流量の2~3倍の値となり、比流量で22~31m³/s/km²程度と推定された。

この比流量を全国の他の比流量と対比する。

表 8-2-1 余笹川流域の極値流量の推定結果および比流量

	位置	流域面積 (km ²)	平成10年洪水 ピーク流量Q ₀ (m ³ /s)	極値的流量Q (m ³ /s)	Q/Q ₀	極値的流量の 比流量 (m ³ /s/km ²)
余笹川谷底侵食低地	5.2k	127	1,740	3,900	2.2	31
	8.2k	127	1,740	3,600	2.0	28
余笹川谷底堆積低地	19.5k	38	400	1,080	2.7	28
黒川谷底侵食低地	7.2k	98	810	2,800	3.5	29
	8.2k	98	810	2,200	2.7	22
	16.5k	91	750	2,300	3.1	25

今回対象とした余笹川の流域面積は、A=100km²程度と比較的小規模である。比較的小面積な流域の比流量図としては、ダムの計画に用いる比流量曲線がある。花籠(1970)⁴⁾は、我が国のダム地点で記録されている既往最大流量値について収集した500余地点の資料を整理し、地域別の比流量図を作成した。地域区分は、気候区割、季節的降雨量とその地域分布の類似する区域から最大包絡線がほぼ同一となる地域を統括して7群に設定された。また、包絡線への適合性の良いクリーガー(Creager)曲線が適用された(図8-2-1参照)。

比流量包絡線は流域面積が変数となっており、それ以外の多くの影響要素(気象、水文、地形、地質、地被など)をすべて含んだ係数Cがパラメータとなっている。諸外国の資料では、同一の気候区または地方区に対して地勢と気象状態は大きく変動するものではなく、比流量図は流域面積を変数としてかなりまとまった群となることが認められており、これらの点の包絡線は経験的な地域最大規模として取り扱うことの有効性が知られている。

また、ダムの極限的な安全確保を考えれば、各地域に生じている最大規模の降雨によって生じた流量規模、言い換えれば経験的的最大流量規模を設計流量として扱うことにおいて妥当な考え方と言える。

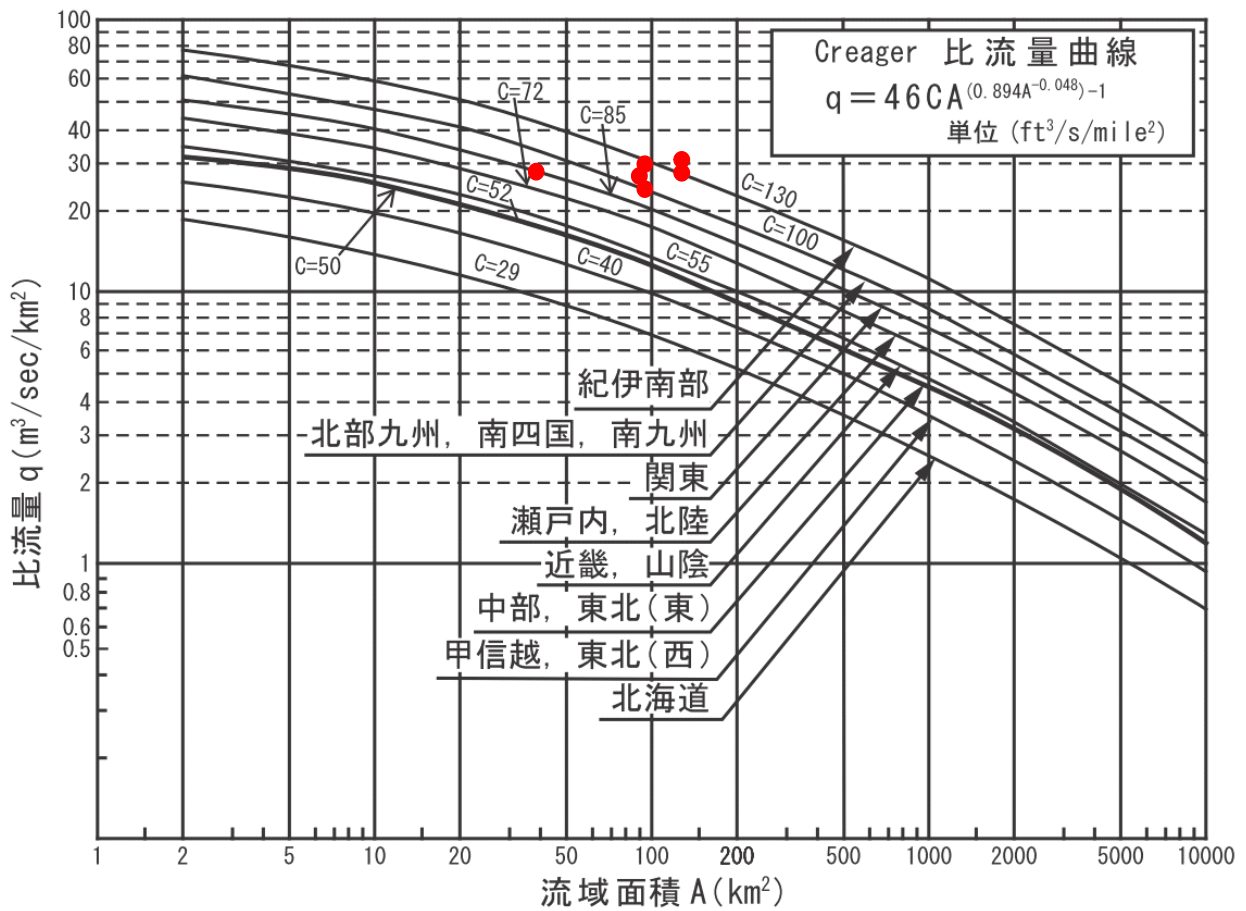


図 8-2-1 地域別ダム地点既往最大比流量包絡曲線 (花籠 1970) ⁴⁾

比流量図に今回推定した極値流量の比流量値をプロットした結果を図 8-2-1 の赤丸で示す。その後、1977 年に河川管理施設等構造令及び同令施行規則の運用について、建設省局長通達の中で地域別比流量図は、図 8-2-2 のように示された⁵⁾。11 の地域に細分化され、余笹川の推定極値流量の比流量は、やはり紀伊南部の曲線付近にプロットされた。栃木県は関東地域に区分されることから、地域別比流量では $17\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 程度となり、極値流量はその約 1.6 倍に相当することとなる。

これらの図より、余笹川の極値流量の比流量 $q \approx 28\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ の値は、クリーガー比流量曲線における南西日本の比流量に相当し、現世における過去の気候変動を踏まえると我が国で起こり得た洪水規模であると判断した。また、今後の地球温暖化に伴う気候変動を踏まえると同規模の事象は起こり得ると判断する。

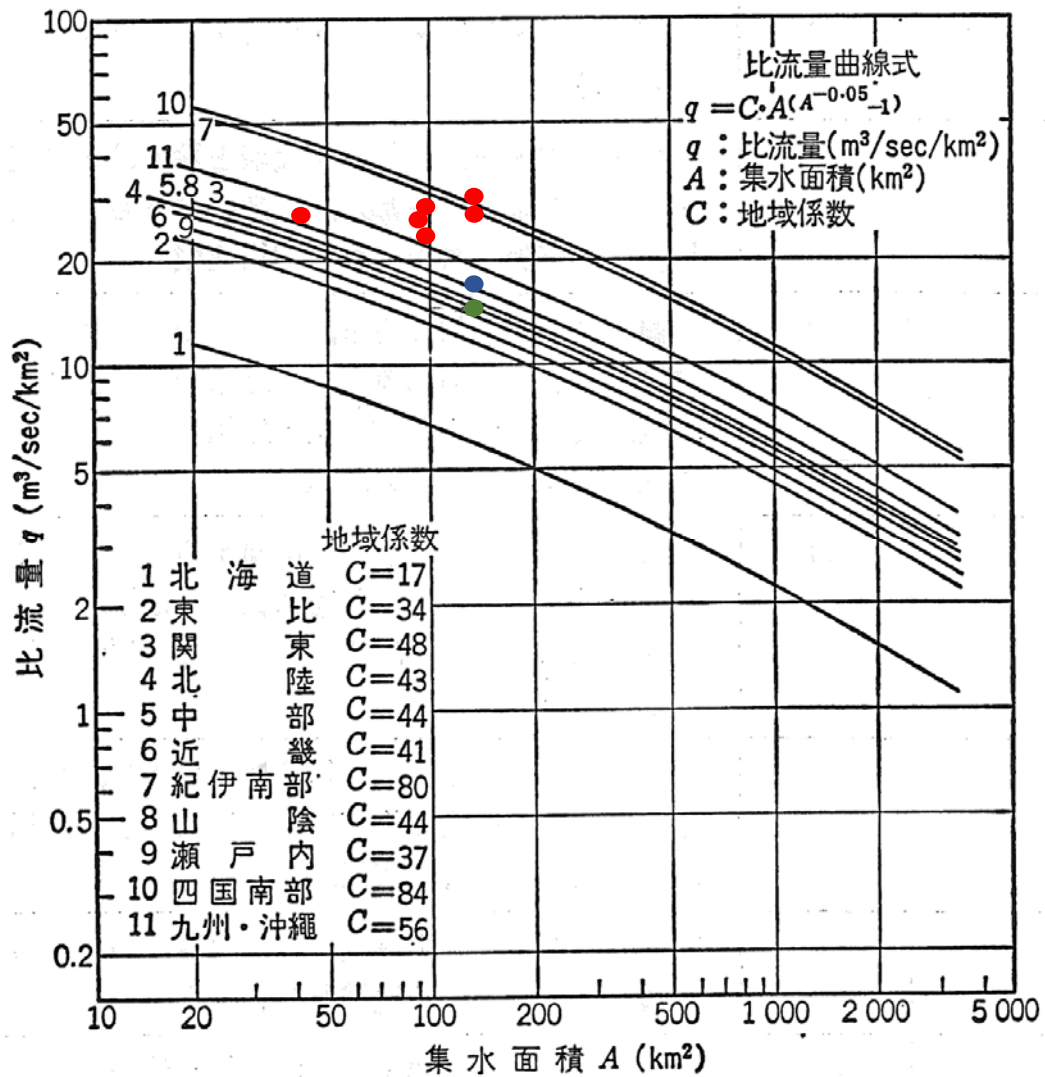


図 8-2-2 地域別比流量図 (1977 年建設省河川管理施設等構造令)⁵⁾

赤丸 : 本研究で求めた極値流量の比流量

青丸 : 関東の比流量曲線での当該地点 (余笹川下流) の比流量

緑丸 : 1998 年洪水ピーク流量の比流量

【参考文献】

- 1) 一級河川那珂川水系余笹川災害復旧全体計画説明資料，栃木県，1998.
- 2) 藤部文明：極端な豪雨の再現期間推定精度に関する検討，天気，57.7，pp449-461，2010.
- 3) 葛葉泰久：既往最大値の再現期間を考慮した日降水量確率分布の推定，水文・水資源学会誌，第28巻第2号，pp59-71，2015
- 4) 花籠秀輔：実績比流量資料によるダム設計洪水流量のチェック，土木技術資料12.-4，1970.
- 5) 改訂 解説・河川管理施設等構造令，（一社）日本河川協会，pp408，2000.

第9章 結論及び展望

9.1 本研究の結論

谷底侵食低地を流れる余笹川を対象に、谷底低地に刻まれた地形・地質の痕跡から現世（完新世）における既往最大洪水流量（極値流量）の推定を試みた。その結論は以下の通りである。

- 1) 谷底侵食低地において、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推定できる可能性を示した。
- 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、段差の上段と下段の地質構成を検土杖などにより調査した。その結果、地質が不連続な状態で高低差が1m程度の段差の場合、大規模洪水時の侵食作用により形成された段丘である可能性がある。
- 3) 坂口らの大洪水時の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、 $D_f > 0.3$ の複断面的蛇行流れ（湾曲部をショートカットする流れ）となる箇所では、河幅を侵食幅で表現し無次元化し、福岡の式を適用することにより、福岡の式の平均式に対応することが分かった。
- 4) 谷底低地を流れる余笹川の流れを単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れに分けて考えることにより、それぞれの場合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。
- 5) 余笹川中流域の堆積卓越区間における氾濫堆積物の堆積環境から推定した過去の洪水規模の推定値、及び隣接する黒川の侵食卓越区間における余笹川と同様の算出法に基づく極値流量の推定値との比較において、余笹川下流域で推定した極値流量は概ね妥当な値であることが示された。その値は、1998年（平成10）洪水ピーク流量の2～2.2倍であり、比流量で $q=26\sim 31 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ である。その発生時期は放射性炭素年代測定より3,300～3,400年前頃と推定される。
- 6) 谷底侵食低地に堆積している砂、シルト、粘性土の河川堆積物に含まれる表層から1m程度の深さの腐食土層を対象に放射性炭素年代測定を行った結果、余笹川及び黒川の谷底低地の原型が形成されたのは今から5,500～6,100年前であると考えられる。
- 7) また、放射性炭素年代測定より、今から660～670年前には、侵食地形、堆積した土砂から推定して、余笹川で比較的規模の大きい洪水が発生した時代と考えられる。
- 8) 本研究で推定した極値流量は、縄文海進以降に発生したものであり、現在よりも気温が 2°C 程度高かった時期に発生した可能性がある。一方、今世紀の終わりには地球温暖化の影響で平均気温が現在よりも 2°C 程度上昇することも予測されている。余笹川の極値流量の比流量 $q \approx 28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ の値は、クリーガー比流量曲線における南西日本の比流量に相当し、現世における過去の気候変動を踏まえると我が国で起こり得た洪水規模であると判断した。また、今後の地球温暖化に伴う気候変動を踏まえると同規模の事象は起こり得ると判断した。

9.2 今後の展望と課題

本研究は、余笹川流域内の余笹川および黒川の極値流量に関する研究である。余笹川と黒川の地質的な違いは、上流域において那須岳（茶臼岳）の1万6千年前以降のマグマ噴火による火砕流堆積物の分布の有無がある。この有無は、融雪型火山泥流災害発生の可能性を示すものであり、実際に那須岳の1410年噴火（3月5日）により融雪型火山泥流が発生し180名が亡くなったとの記録が残っている（神明鏡より）。豪雪地帯で活火山を有する流域ではこの事象によるピーク流量も考慮しておかなければならない。極値流量を調査する場合、それが豪雨に伴うものか、融雪型火山泥流や天然ダム決壊などの複合的な要因によるものか見極める必要がある。本研究において、余笹川と黒川の極値流量はほぼ同じ洪水であることが確認されたことから、余笹川で推定した極値流量は融雪型火山泥流によるものではなく、異常豪雨により発生した洪水の可能性が高いと考えられる。しかし、余笹川流域の防災を考える上で融雪型火山泥流の発生機構を含めてその事象の可能性・規模に関する研究を今後進める必要がある。

昨年8月に岩手県に上陸した「平成28年台風第10号」では、岩泉町の小本川において谷底低地に立地していた高齢者グループホームの入所者が氾濫流により亡くなる痛ましい災害が発生した。谷底低地は谷底幅いっぱいに流れる大規模洪水が発生した場合、洪水からの避難が困難な地形条件であり、早めの避難が必要となる。その上でも、本研究のように谷底部の地形・地質状況から過去の大規模洪水の規模（極値流量）を予測しておくことは減災・防災対策を考える上で特に重要となる。今後は、谷底平野の地形・地質状況を詳細に調査することにより極値流量を推定する試みを他の河川でも行い、その手法を汎用性のある確かなものとしていきたい。

謝 辞

現在、私は新潟市内の建設コンサルタント、株式会社キタックに勤務しております。このたび、中央大学大学院社会人博士課程におきまして、学位論文をまとめることができました。ここに至るまで、多くの方々のつながり、支えがありましたので、ここに記して感謝の意を表します。

平成20年に開催された千曲川の河道研究会に弊社は上林好之顧問（元建設省）を中心に参画し、中央大学の福岡捷二教授に地形・地質の観点から河川の成り立ちを明らかにしようとする弊社の取組みを説明させて頂く機会がありました。その後、平成25年の冬に弊社 大谷政敬 技術顧問（当時副社長）より福岡先生のもとで学位論文を書いてみないか、との話を戴きました。私にとっては青天の霹靂であり、実行できるか不安はありましたが、会社全体での取組みであることを支えとして、また励みとして、平成26年4月に入学し研究を始めました。本研究のきっかけを作ってくださいました上林顧問からは、その後も研究に対する取組み姿勢などをご自身の経験を踏まえてご指導頂きました。感謝申し上げます。有難うございます。

本研究の主査を務めてくださいました中央大学理工学部教授の山田正先生には、研究の方向性、研究成果の取りまとめ方において適切にご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。また、副査の中央大学理工学部の齋藤邦夫 教授、大下英吉 教授、田口東 教授からは、論文審査において多角的なご意見・ご指導を賜り、学外から副査をお引き受けくださいました東京大学 知花武佳 准教授には本研究の研究の意義、取り纏め方、今後の展開などについてご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。そして、副査の中央大学研究開発機構の福岡捷二教授には、研究テーマの選定から技術者・研究者としての生き方・考え方など幅広くご指導を賜り、感謝の念に堪えません。中央大学研究開発機構の内田龍彦教授、福田朝生准教授、後藤岳久助教、竹村吉晴助教、田端幸輔助教、及び立山政樹様をはじめとする福岡ユニットの大学院生には入学から論文審査に至るまで様々な場面でアドバイスやご支援を頂き、私が住む新潟と大学のある東京の距離の溝を埋めて頂きました。大変感謝しております。有難うございます。

研究を進めるための資料収集では、先行研究の坂口達哉様からそれまでに収集された貴重な資料を整理して頂き、関東地方整備局、栃木県、東日本高速道路(株)の各位からは余笹川、黒川に係わる古い資料を探してご提供頂きました。心より御礼申し上げます。

株式会社キタックでは、中山輝也会長（当時社長）をはじめとして社員全員のご理解とご支援を賜りました。特に、仕事に携わりながらの研究は、少なからず社員全員に負担をかけることとなりましたが、全社員の協力により乗り切ることができました。心より感謝の意を表します。とりわけ、研究に対し直接ご助言、ご助力を頂きました、大谷政敬 技術顧問（当時副社長）、平野吉彦 専務、佐藤豊 部長、江川千洋 次長、金岡民善さん、味方圭哉さん、内藤優さん、飯澤周佑さん、池田真彦さん、龍田栄次さん、佐藤一博さん、日野原達也さん、山岸由佳さん、渡邊寛也さん、星野海斗さん、近藤仲恵さん、小崎栄来さん、難波須美子さん、渡邊由香さんらには感謝申し上げます。このように、この論文は株式会社キタック全体で取り組んだ成果であり、私が代表してとりまとめさせて頂くものであります。

振り返ってみますと、このような成果を残すことができたのも、様々な人のつながり、研究フィールド、タイミング、判断などがすべて揃ったことによるものであり、天地人の条件、特に多くの方々のつながりの大切さに気づかされます。すべての方々に対し、衷心より感謝申し上げます。

最後に、研究期間中は生活が不規則になりがちで大変な時期もありましたが、そんな時も妻と子供らの理解と笑顔に励まされ、乗り越えることができました。支えてくれた家族に感謝します。

涌井 正樹