

川内川流域の地形・地質を踏まえた基盤浸透による堤防破壊危険性の評価

株式会社建設技術研究所

国土交通省国土技術政策総合研究所

中央大学研究開発機構

○白石 芳樹

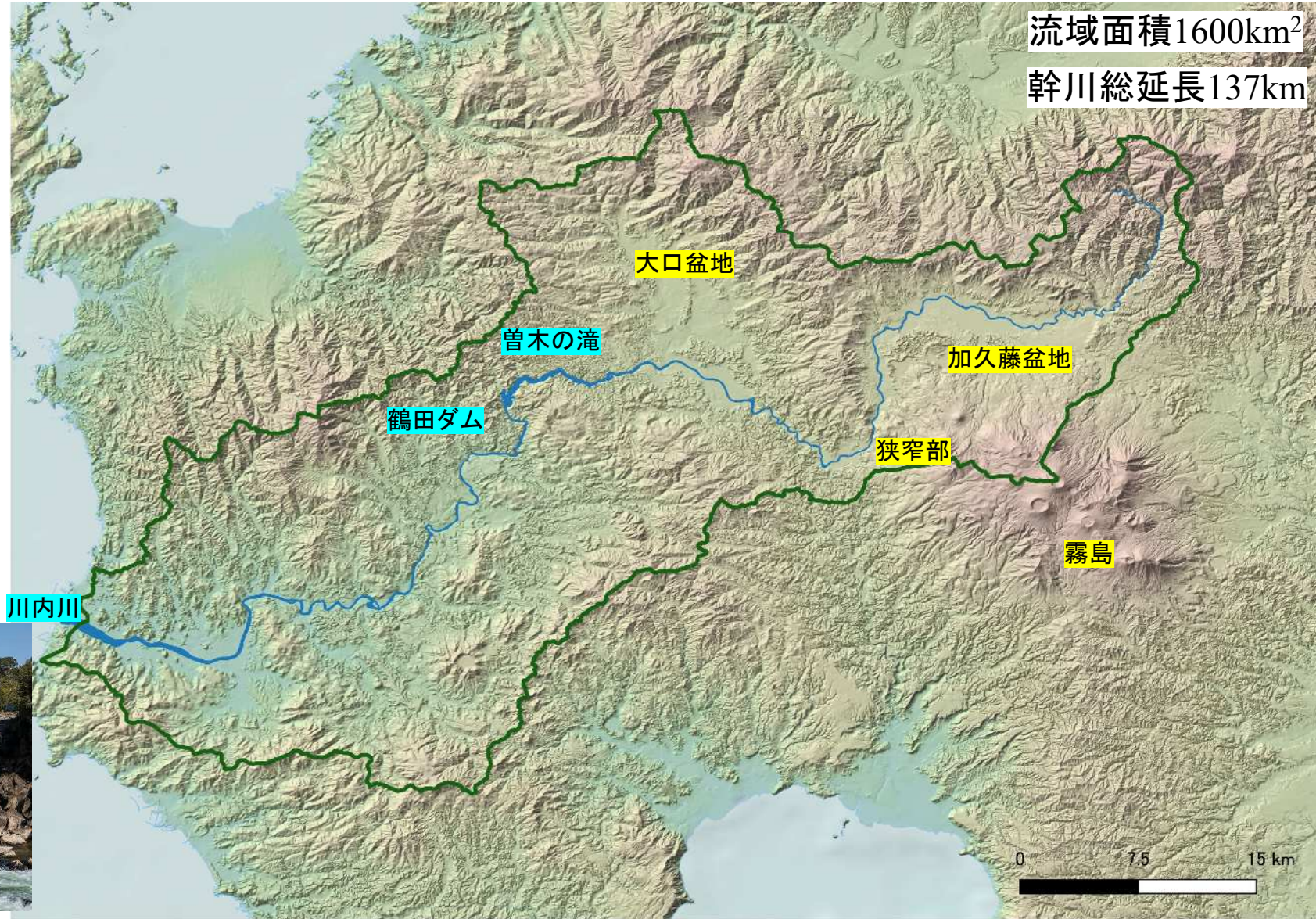
田端幸輔

福岡捷二

1. はじめに

■川内川の特徴

- ①火山活動に起因した盆地と狭窄部の地形, 互層構造の基盤を形成
- ②基盤層に明確な透水層が存在
- ③火砕流堆積物(シラス)によって基盤が構成



曾木の滝

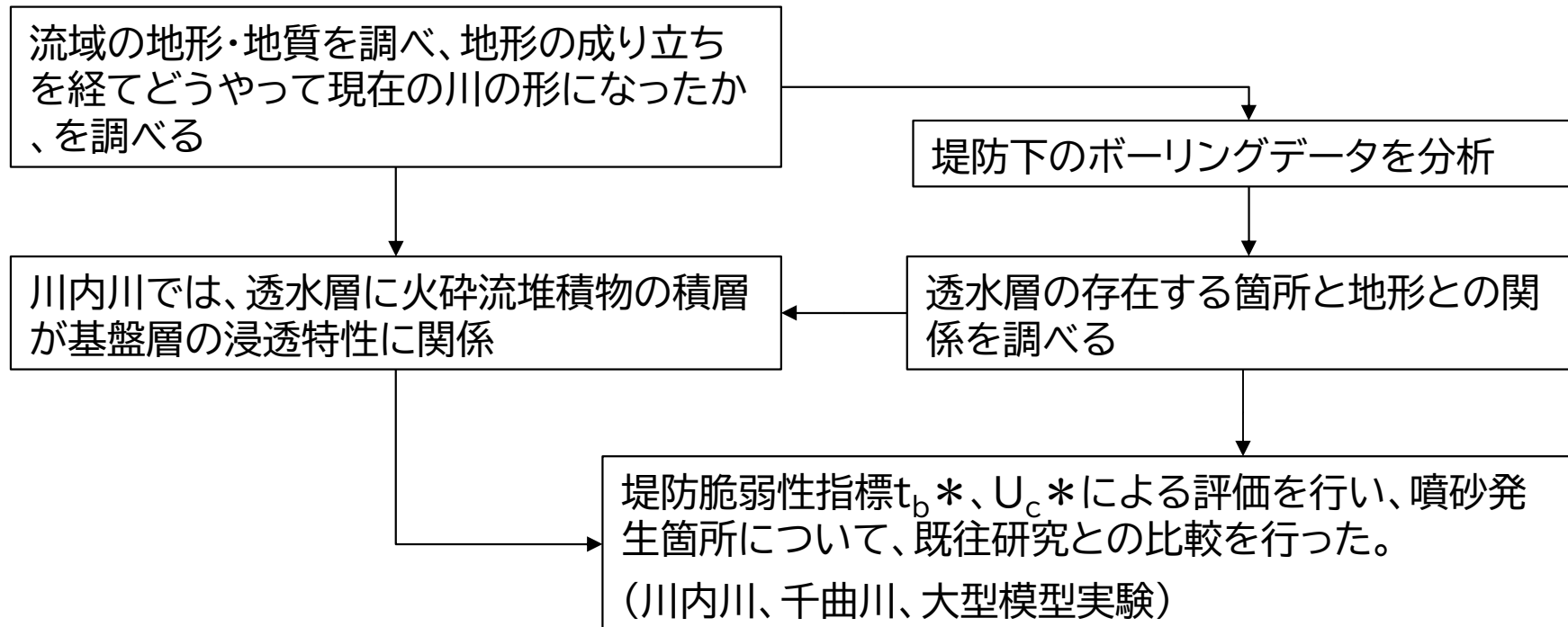


川内川

2. 研究の流れ

■ 本研究の概要と流れ

- 九州の中で特に、基盤層に明確な透水層が存在する川内川を対象とする。
- 一般に、砂礫層の上に難透水層が被覆した互層構造では、洪水時に基盤漏水に起因した堤防被災が生じやすい。
- 川内川流域は、火砕流堆積物(シラス)によって基盤構造が構成されており、火山灰が積層したのちに流水によって堆積した地層を有し、互層構造となっている。
- しかし、これまでに支川で噴砂が生じた他に大規模な被災は確認されていない。
- 本研究では、川内川流域を対象に本支川の土質構成, 土質特性, 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* 、均等係数 U_c^* を調べ、堤防破壊危険性に関する評価を行う。



3. 川内川流域の基盤構造の特徴

■ 川内川流域の成り立ち

加久藤カルデラ(約30万年前)は, 大規模火砕流を伴う大噴火で湖が出現



栗野岳溶岩流によって堰き止められ, 湖が形成



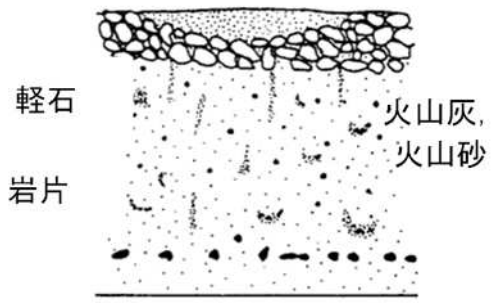
阿多カルデラ(約10万年前)が噴火



始良カルデラ(約2.5万年前)を出現させた噴火によって入戸(いと)火砕流が噴出し堆積



QGISにて国土地理院色別標高図、標準地図を重ね合わせて作図

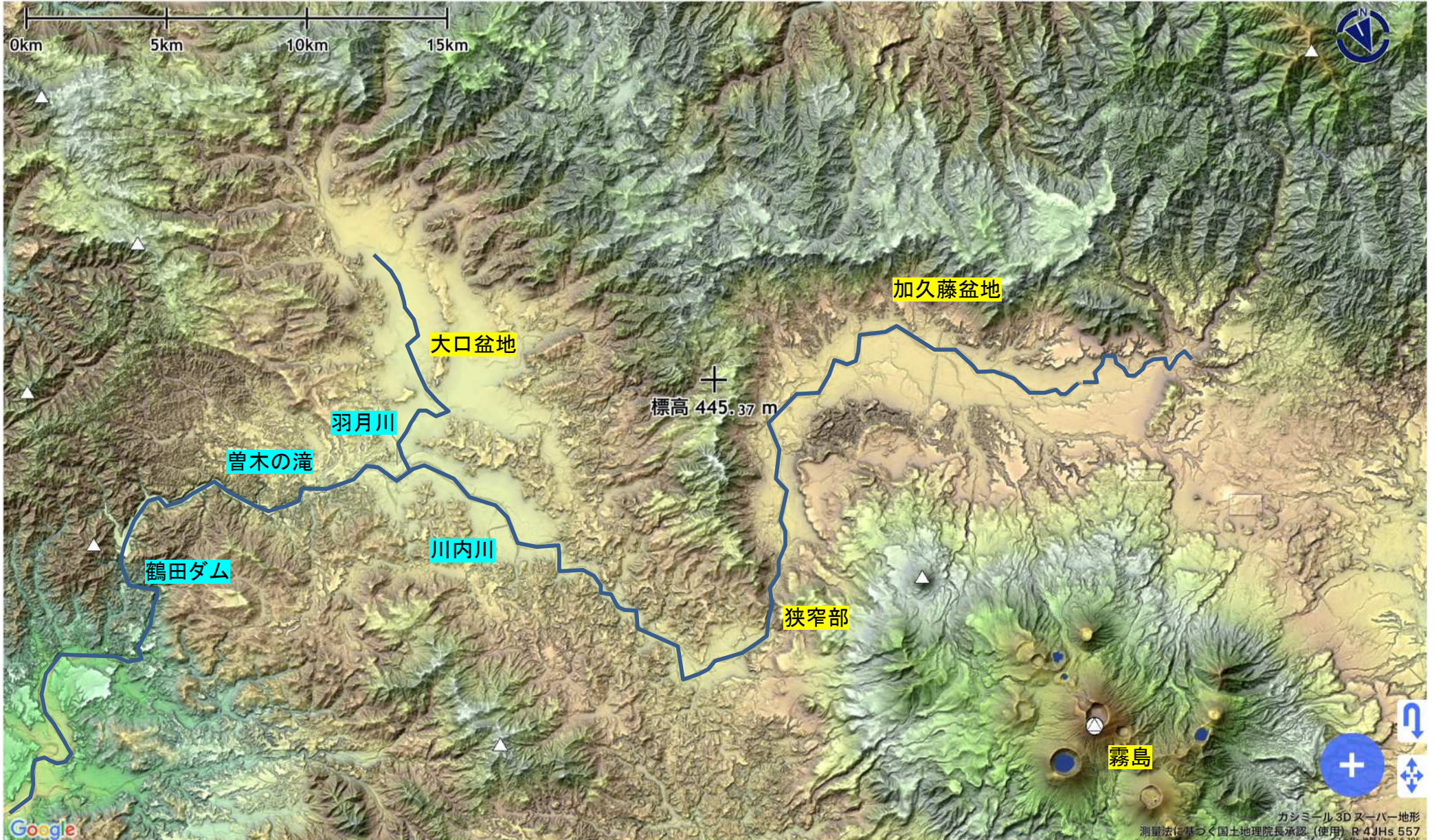


タイプ 3

・入戸火砕流堆積物は、火山ガスが流動的であったことから、上層に軽石がほぼ水平に堆積する特性がある

3. 川内川流域の基盤構造の特徴

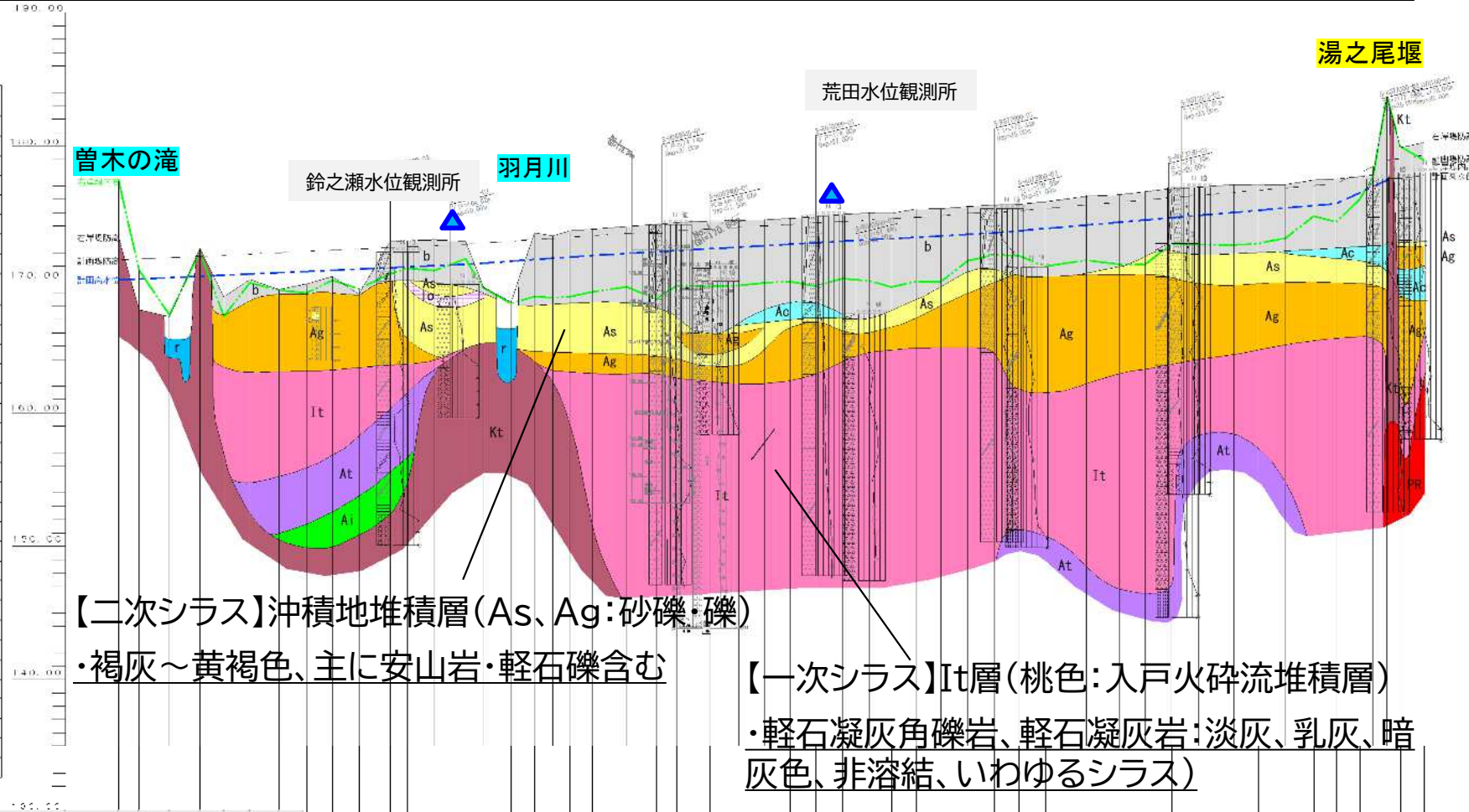
・川内川流域は主に2つの盆地(大口盆地、加久藤盆地)からなり、狭窄部で20m程度の高低差がある



3. 川内川流域の基盤構造の特徴

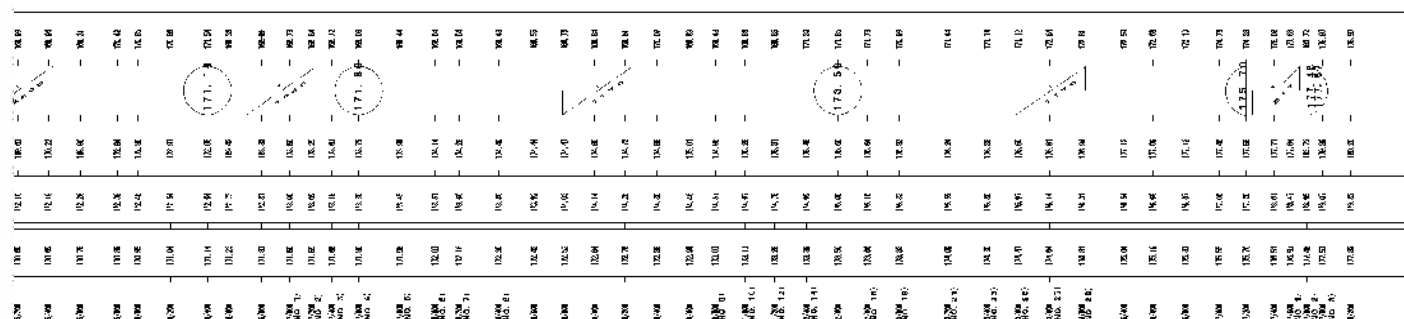
・一次シラスの上に積層している沖積地堆積層(Ac層、As層、Ag層)のうち、透水係数が $10^{-5}m/s$ 以上を透水層とした。

時代	地層名	記号	地質	主要構成	記事
更新世	堤 埴 土	St	砂礫、礫まじり砂、シルトまじり砂	全 域	沖積層、黄褐色、シラス混じり砂・礫物を含む
	飛 砂 堆 積 層	Fl	砂、シルト、粘土	全 域	上層、下層は礫は存在
	堤 埴 堆 積 層	St	礫まじり粘土	全 域	沖積層、不均質、礫物堆積物を含む
沖積地	沖積地堆積層	Ac, As, Ag	シルト質砂、シルト質砂、シルト質砂、シルト質砂	中・上層	礫・黄褐色、礫物を含む 礫物・黄褐色、主に沖積地で堆積した礫物、礫物を含む 礫物・黄褐色、主に沖積地で堆積した礫物、礫物を含む
	沖積地堆積層	Ac	礫まじり砂	全 域	黄褐色、安山岩、軽石礫物を含む
	沖積地堆積層	As	砂、礫	全 域	黄褐色、主に沖積地で堆積した礫物、礫物を含む
第四紀	乳 白 段 丘 堆 積 層	Ca	砂、シルト、粘土	中流域	礫物のみ
	入 戸 火 砕 流 堆 積 層	It	軽石凝灰角礫岩、軽石凝灰岩	全 域	礫物、主に沖積地で堆積した礫物、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	砂、シルト、粘土	中流域	大規模な火砕流堆積物、礫物、砂、シルト、粘土、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	砂、礫、礫まじり砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	シルト質砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	シルト質砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	シルト質砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	シルト質砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	シルト質砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む
	加 久 保 堆 積 層	Ka	シルト質砂	中流域	砂礫・黄褐色、礫物を含む



【二次シラス】沖積地堆積層(As、Ag:砂礫・礫)
・褐灰～黄褐色、主に安山岩・軽石礫物を含む

【一次シラス】It層(桃色:入戸火砕流堆積層)
・軽石凝灰角礫岩、軽石凝灰岩:淡灰、乳灰、暗灰色、非溶結、いわゆるシラス



一次シラス(74~250um) 旧砂丘地の砂(250~420um)

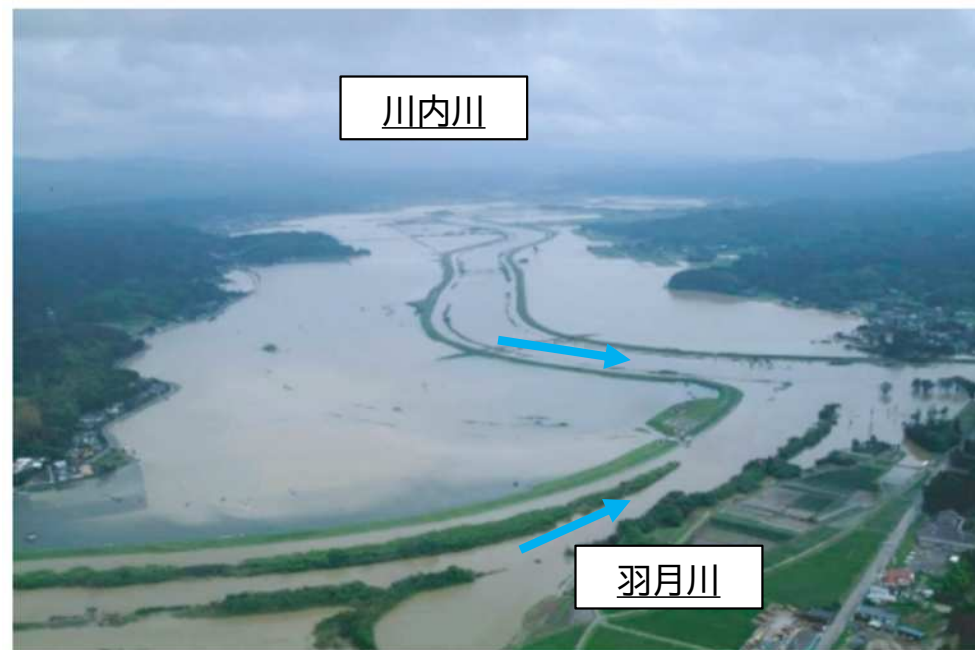
3. 川内川流域の基盤構造の特徴

・川内川36.8k付近の推進(しごめ)分水路の開削状況を示す。シルト質の上層に礫もしくは礫質砂が水平に堆積(火砕流堆積物の特徴を示す)

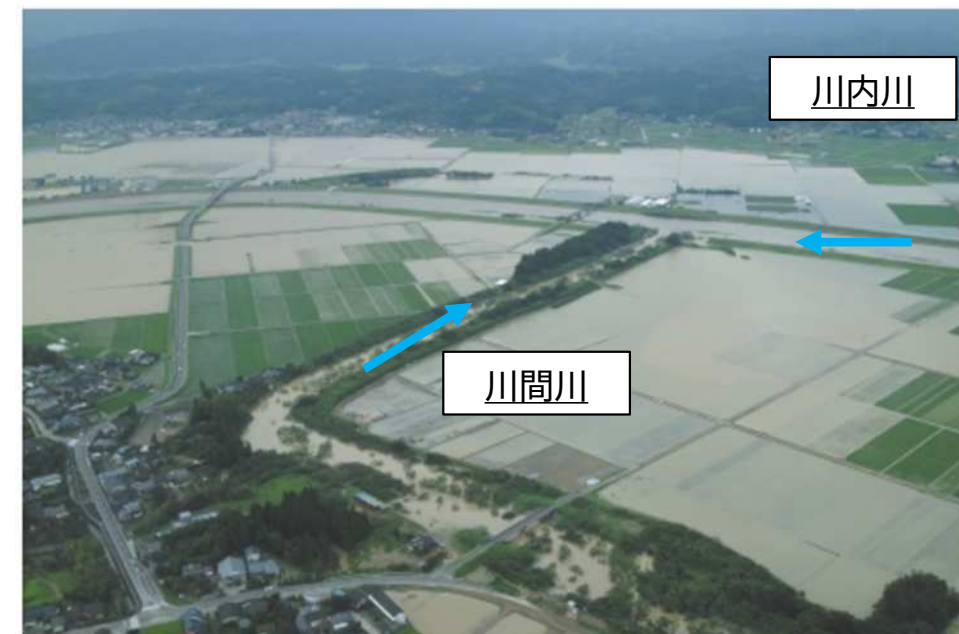


4. 川内川流域のH18洪水の特徴

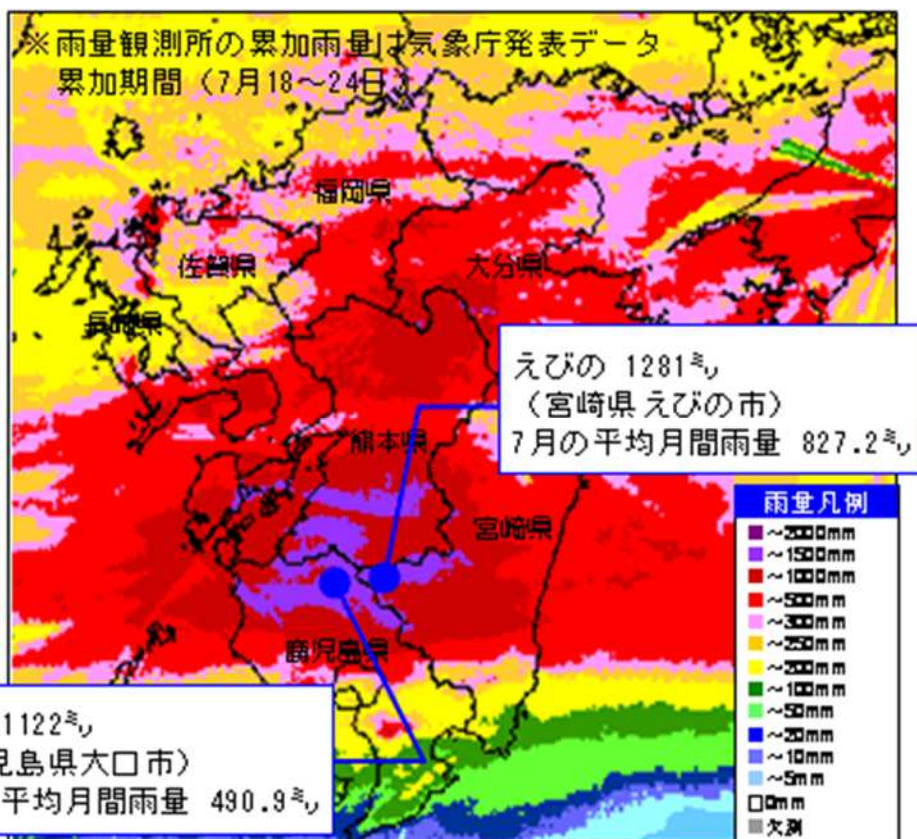
- ・平成18年7月15日～24日に総雨量1200mmを超える大雨
- ・大口盆地他、加久藤盆地、鶴田ダム下流で浸水被害が発生



川内川中流域及び羽月川（大口市 大口・羽月地区）における浸水状況



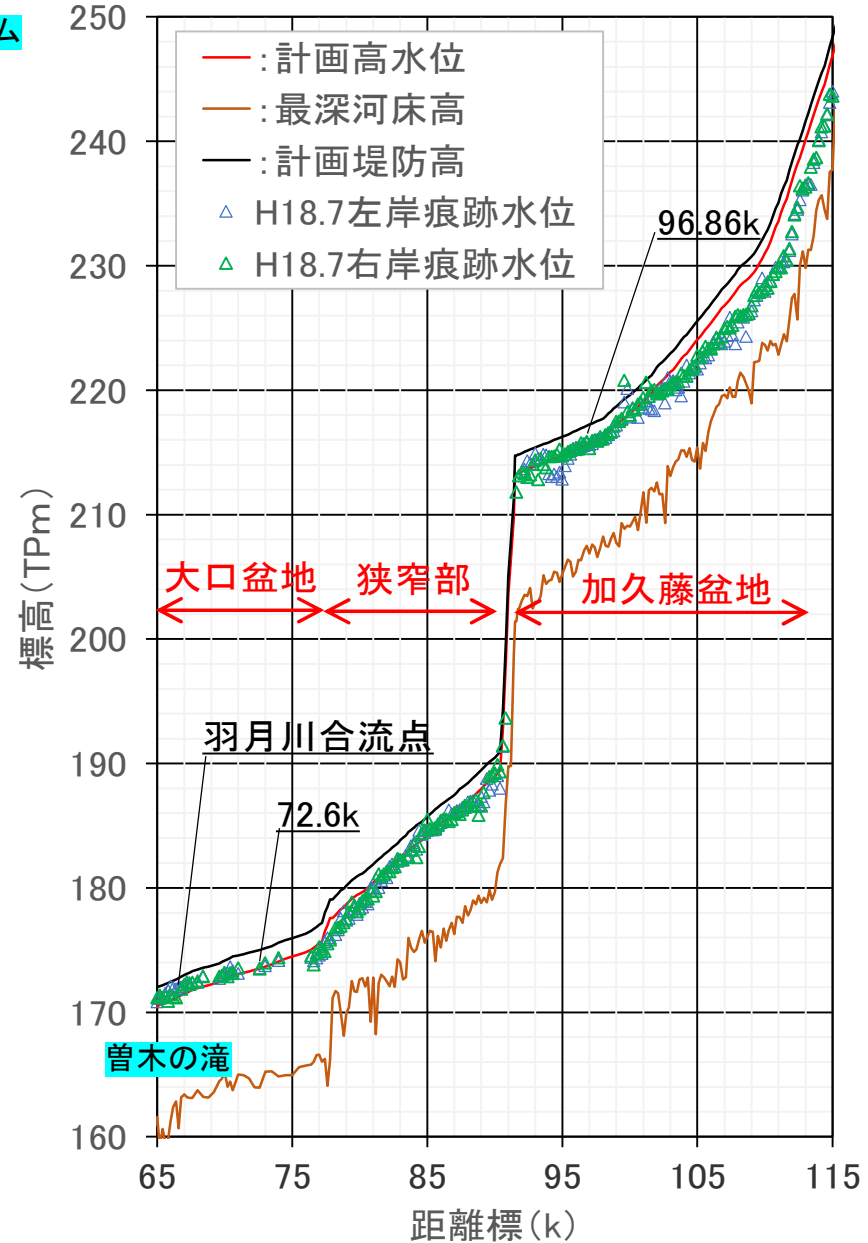
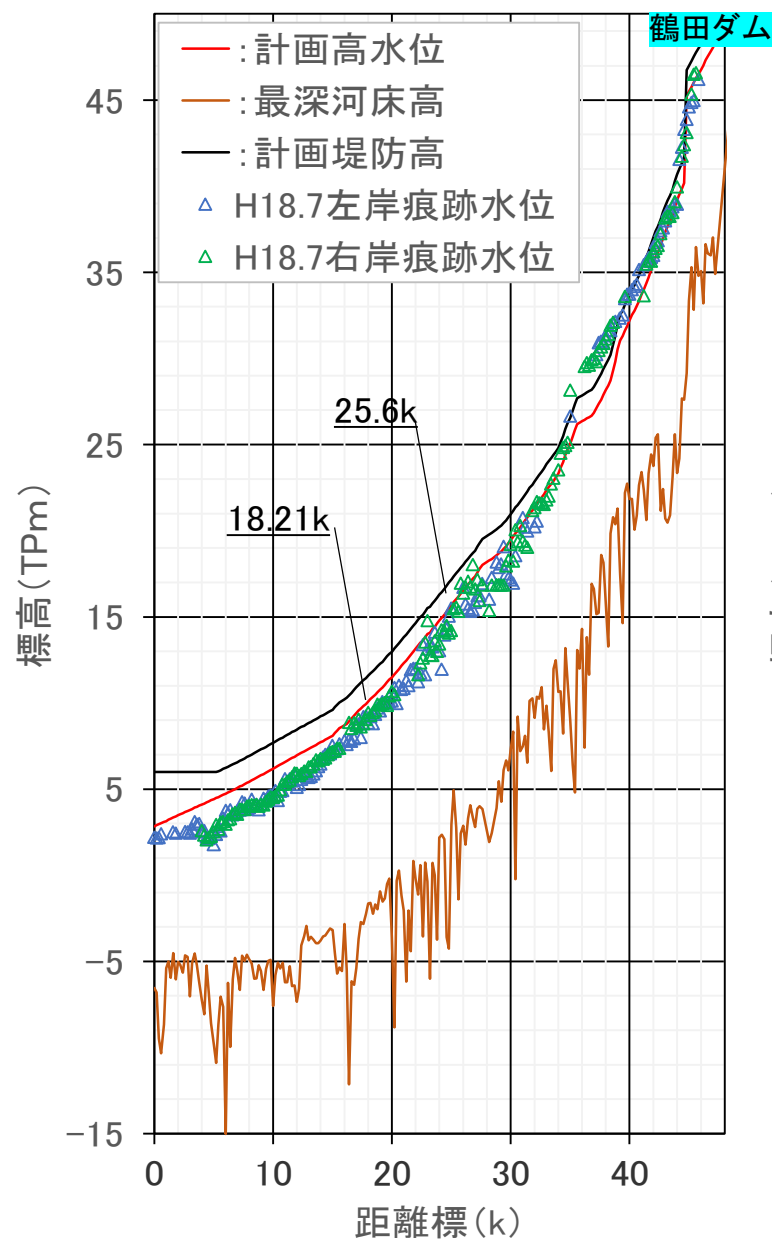
川内川中流域及び川間川（菱刈町 前目・本城地区）における浸水状況



2006年7月18日0時～23日18時
累加雨量(国土交通省レーダ)

4. 川内川流域のH18洪水の特徴

・11箇所を観測史上最高水位を観測し4箇所においては計画高水位を超えた。



5.被災箇所への地質的特徴の整理

・川内川68.6k右岸側に合流する羽月川の2k右岸の複数箇所で噴砂が発生。

図 羽月川2.0k噴砂状況 (H18)

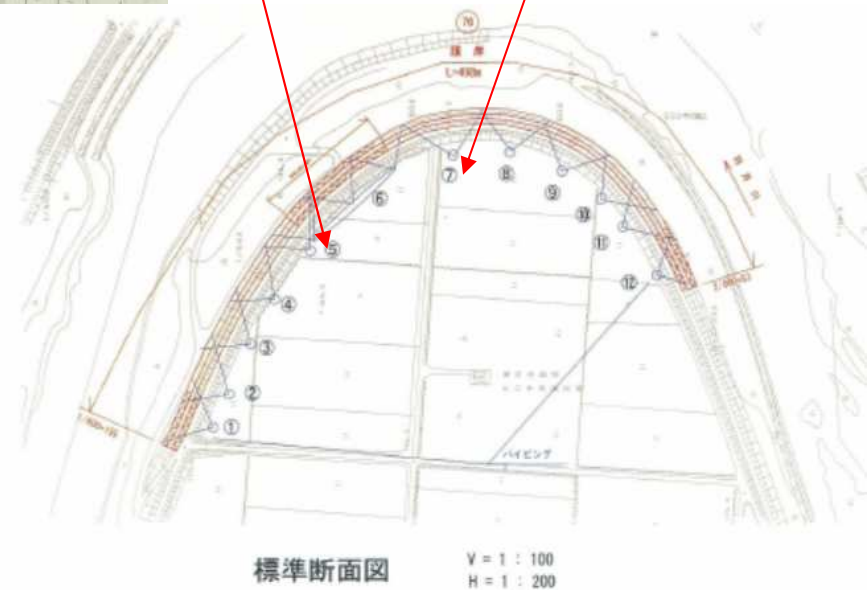
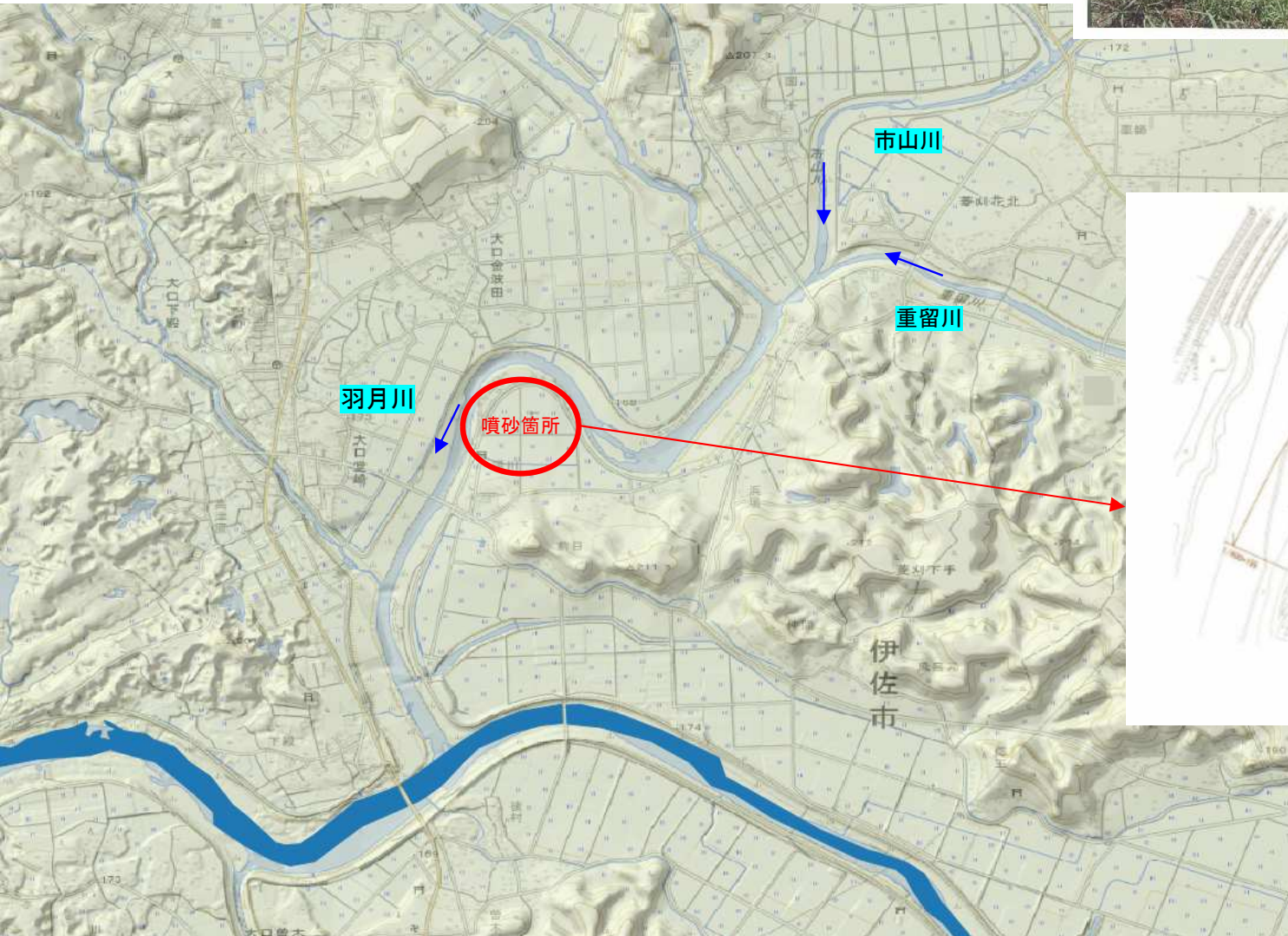


図 羽月川2.0k付近噴砂発生箇所 (H18)

・噴砂箇所のボーリング調査結果では、164m以深に一次シラス層が堆積し、その上に二次シラス層(と想定される砂礫層)が存在している。

・二次シラス層は透水係数が $\times 10^{-4}m/s$ と高い透水性を示す。

・噴砂の発生メカニズムは不明であるが、液状化が発生しやすい土質特性で噴砂が発生しやすい(梯川の事例より)

・川内川は、液状化発生の可能性範囲よりも粒径分布が大きい。

液状化しやすい粒度分布より大きい

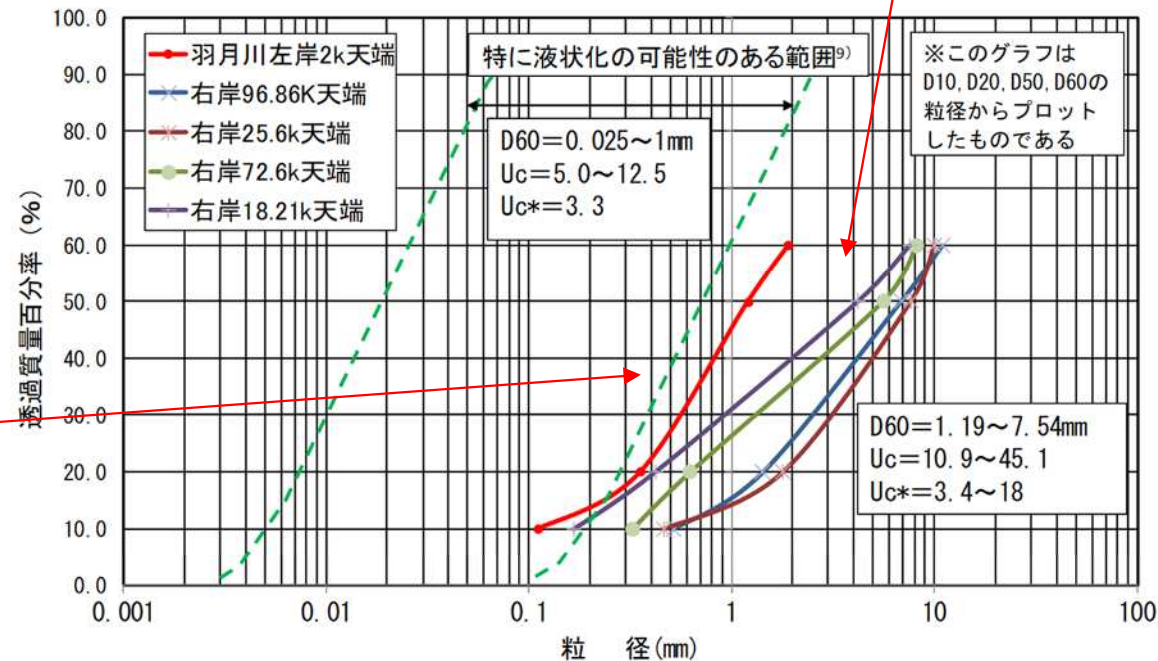
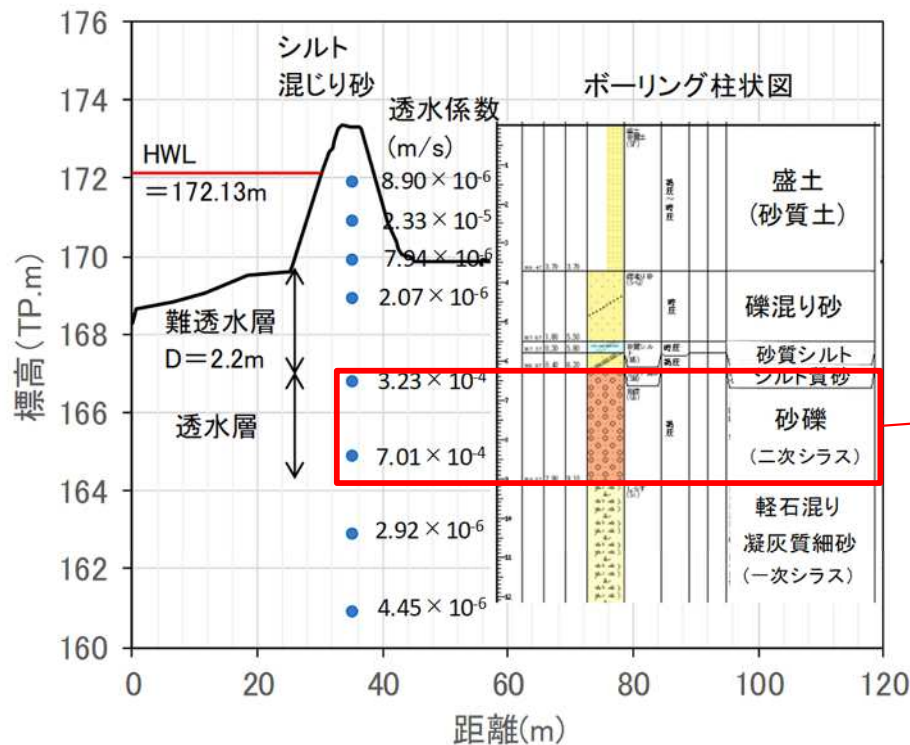


図-6 羽月川 2.0k 左岸ボーリング柱状図と透水係数

図-7 川内川の H18 噴砂箇所粒径加積曲線図

・シラスを基盤層とする大淀川上流部において乱さずに「採取した乱さないシラス」と、「締め固めたシラス」を用いて、室内パイピング実験を実施し、限界動水勾配を計測

$$i_c \gamma_w = \frac{h}{L} \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \quad (1)$$

1より大きい

試料	Dmax	D60	D50	D10	Uc	乱さないシラス	締め固めたシラス
	(mm)					限界動水勾配の実測値/計算値	
A	50	0.28	0.075	0.01	28	3.7~4.8	1.5~5.8
B	30	0.28	0.06	0.016	17.5	1.45~1.63	0.5~1.1
限界動水勾配のA,B平均値						0.94~2.60	0.90~2.50

・「乱さないシラス」の限界動水勾配は、
 試料A(60%粒径D60=0.28mm, 均等係数Uc=28)で計算値の3.7~4.8倍、
 試料B(D60=0.28mm, Uc=17.5)で1.45~1.63倍
 となり、いずれも計算値より大きくなっている。

・シラスの材質そのものが噛み合わせやインターロッキングにより高いせん断力を示す

2. 川内川流域の基盤構造の特徴

【シラスの噛み合わせやインターロッキング】

・シラスは角張った母粒子であるため、基盤層のある深度付近の低拘束圧下では、角張った母粒子同士がかみ合うことで強度が増したという結果がある。

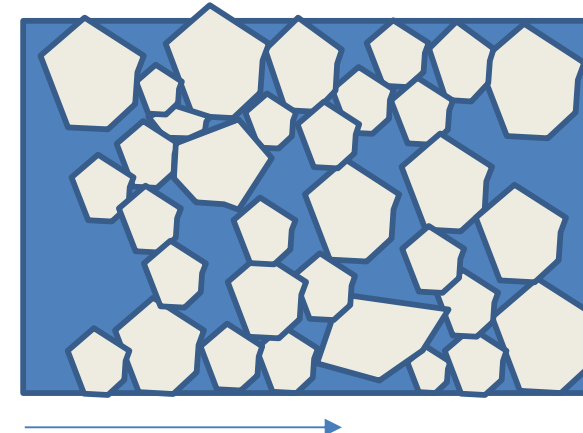
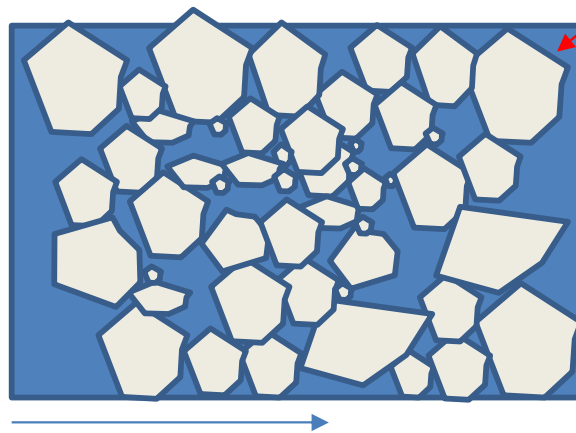
・河川水位の上昇に伴い、間隙水圧が高まることで有効応力が減少し、水平方向へ細粒分が移動ししても噛み合わせによる構造を維持していると推測

角張った母粒子



一次シラス(74~250μm)

旧砂丘地の砂(250~420μm)



パイピング発生により水平方向の
流れが発生し、細粒分が移動

細粒分が移動しても構造を維持

■ 検討手法

・川内川のボーリング調査が実施されている断面を対象に、平成18年洪水における堤防基盤脆弱性指標 t_b^* 及び噴砂発生に関係する均等係数 U_c^* を調べ、基盤層や法尻先の地質との関係を整理し、基礎地盤の浸透に対する危険性を考察

$$t_b^* = \frac{5 k_b (H + D) T}{2 \lambda L^2} \quad (2)$$

$$U_c^* = \frac{D_{60}}{D_{20}} \quad (3)$$

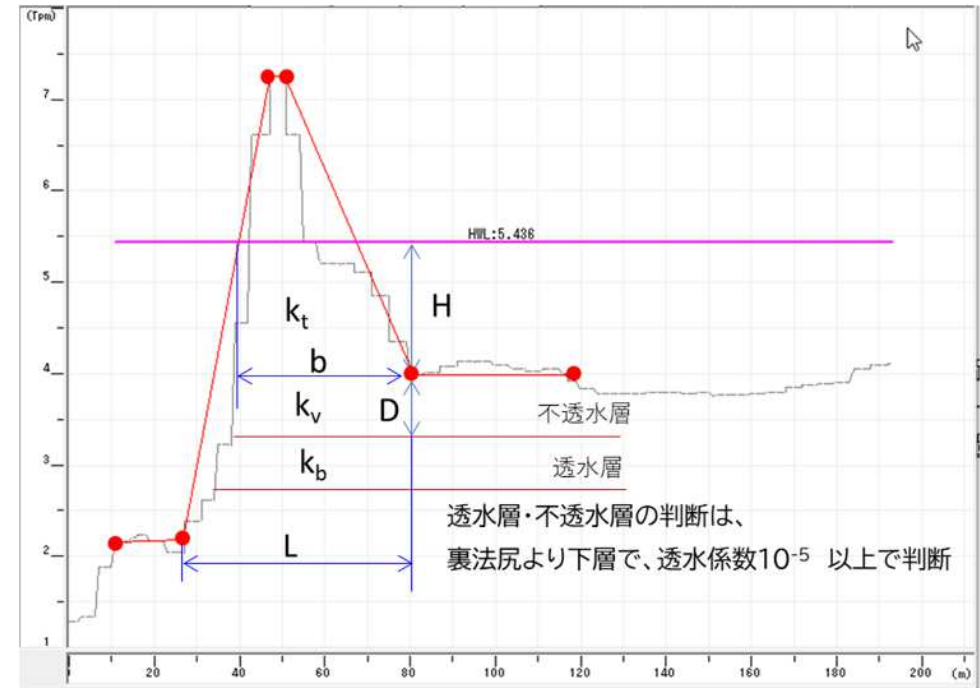


図 堤防断面と各値の取り方

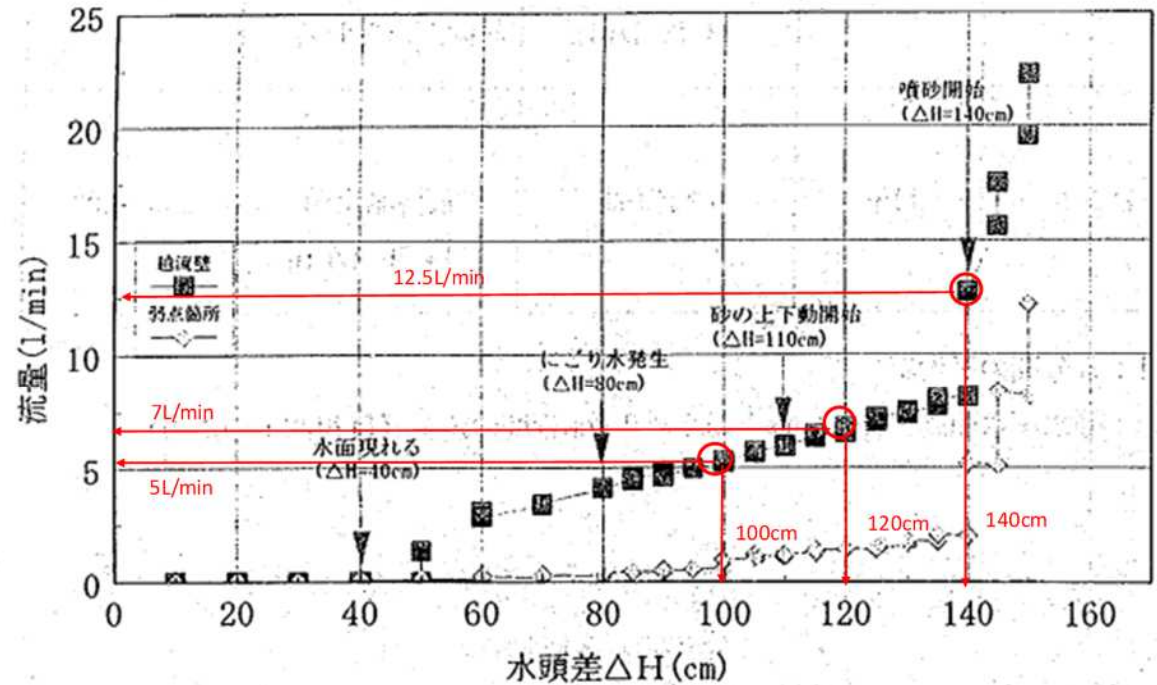
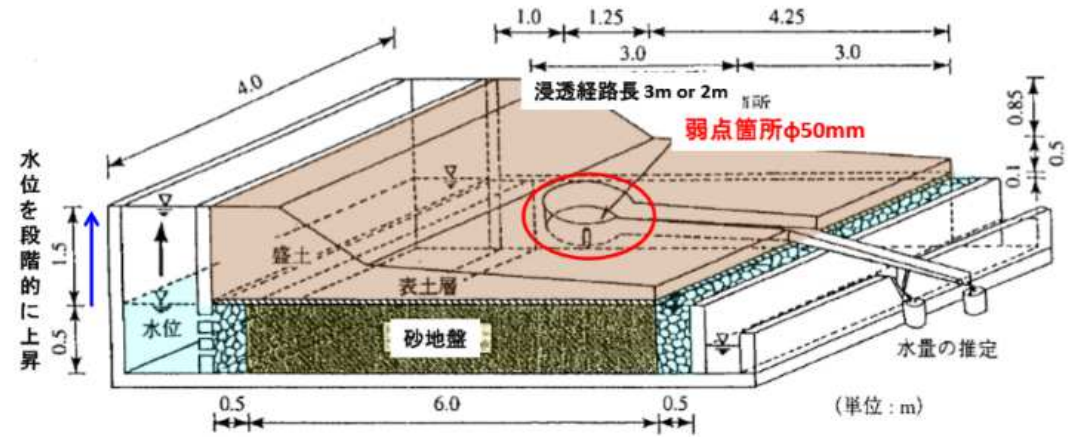
川内川の被災事例が少ないことから、千曲川の t_b^* 、 U_c^* の算定結果に加え、三木らによる実河川の材料を使った水平方向浸透流によるパイピング現象を再現した貴重な大型模型実験での計測結果を引用し、 t_b^* 、 U_c^* の算定を実施し、噴砂発生の領域を調べた。

	川内川	千曲川	大型模型実験
サンプル数	5	14	22
噴砂事例数	1	3	11

■ 検討手法

【大型模型実験による考察】(三木らの実験)

・大型模型実験は、浸透路長3mまたは2mの場所に直径50mmの穴を粘土層・不透水シートに開け、その上に粘土(3cm)を敷き、さらに耐久合板(15mm)を設置し、弱点箇所を設置された。これにより弱点箇所の観察をやすくし、噴砂発生タイミングがわかるように工夫されている。また、弱点箇所からの流出量と砂地盤の端部に設置された越流壁からオーバーフローした流出量を時間毎に観測された。



三木らの模型実験データの tb^* の算定に用いた透水係数 kb は、①噴砂開始前、②噴砂後及びパイピング発生時に記録された水頭差及び越流堤の漏水量を基にダルシー則から逆算した値を用いた

図-3.6.1(2) 水頭差と流量の関係 (ケース16)

■ 検討手法

【大型模型実験による考察】(三木らの実験)

大型模型実験による t_b^* の算出結果(三木ら15)の結果をもとに再整理)

ケース (No)	地盤使用砂	噴砂 有無	噴砂開始の諸元							Uc	Uc* (D ₆₀ /D ₂₀)	透水係数 k _b (m/s)	L (m)	T (s)	H (m)	t _b * (s)
			水頭差 (cm)	流量変化	l/min	水面出現 (分)	開始時間 (分)	終了時間 (分)	経過期間 (分)							
15	霞ヶ浦(美浦)	○	120	ほぼ一定	11.74	30	170	199	29	2.9	2.1	2.77×10 ⁻⁴	3	10140	1.2	4.42E+00
16	鬼怒川	○	140	2から5.21	5.21	40	255	274	19	3.9	2.8	2.28×10 ⁻⁴	3	14040	1.4	5.64E+00
17	利根川	○	120	ほぼ一定	3.62	40	110	124	14	2.5	1.8	1.11×10 ⁻⁴	3	5040	1.2	8.79E-01
18	江戸川(シルト混り)	○	180	ほぼ一定	3.42	95	460	489	29	14.3	2.5	4.26×10 ⁻⁵	3	23640	1.8	2.15E+00
19	霞ヶ浦(麻生1)	○	175	0.66から32	32	10	400	407	7	2.2	1.7	4.68×10 ⁻⁴	3	23820	1.75	2.32E+01
20	玉造	○	165	ほぼ一定	31.08	95	370	375	5	2	1.7	4.82×10 ⁻⁴	3	16800	1.65	1.61E+01
21	鬼怒川	○	135	測定不能	5.98	40	230	279	49	3.1	2.2	1.14×10 ⁻⁴	3	14340	1.35	2.79E+00
22	霞ヶ浦(麻生2)	○	120	ほぼ一定	2.18	40	155	184	29	2.2	1.6	5.75×10 ⁻⁵	3	8640	1.2	7.82E-01
23	利根川下流	至らず	135			145	-	275	-	30.2	7.9	4.28×10 ⁻⁷	2	7800	1.35	
24	長良川	○	110	ほぼ一定	4.28	60	155	169	14	2.1	1.5	1.00×10 ⁻⁴	3	6540	1.1	9.68E-01
25	霞ヶ浦(西の州)	○	200	測定不能	-	50	455	457	2	3.8	2.5	1.14×10 ⁻⁴	3	24420	2	7.95E+00
26	江戸崎	至らず	135			80	-	275	-	52.4	18.7	4.70×10 ⁻⁹	2	11700	1.35	
27	小貝川(吉沼)	至らず	-			-	-	-	-	40.9	9.2	6.51×10 ⁻⁷	2	-	-	
28	渡良瀬川	○	100	ほぼ一定	3.78	40	125	139	14	2.5	1.8	9.72×10 ⁻⁵	3	5940	1	8.02E-01

■ 検討結果

千曲川や大型模型実験では $t_b^* > 1$ 、 $U_c^* < 3$ で噴砂発生する。

一方、川内川では $t_b^* > 2$ 、 $U_c^* < 10$ で噴砂が発生する。

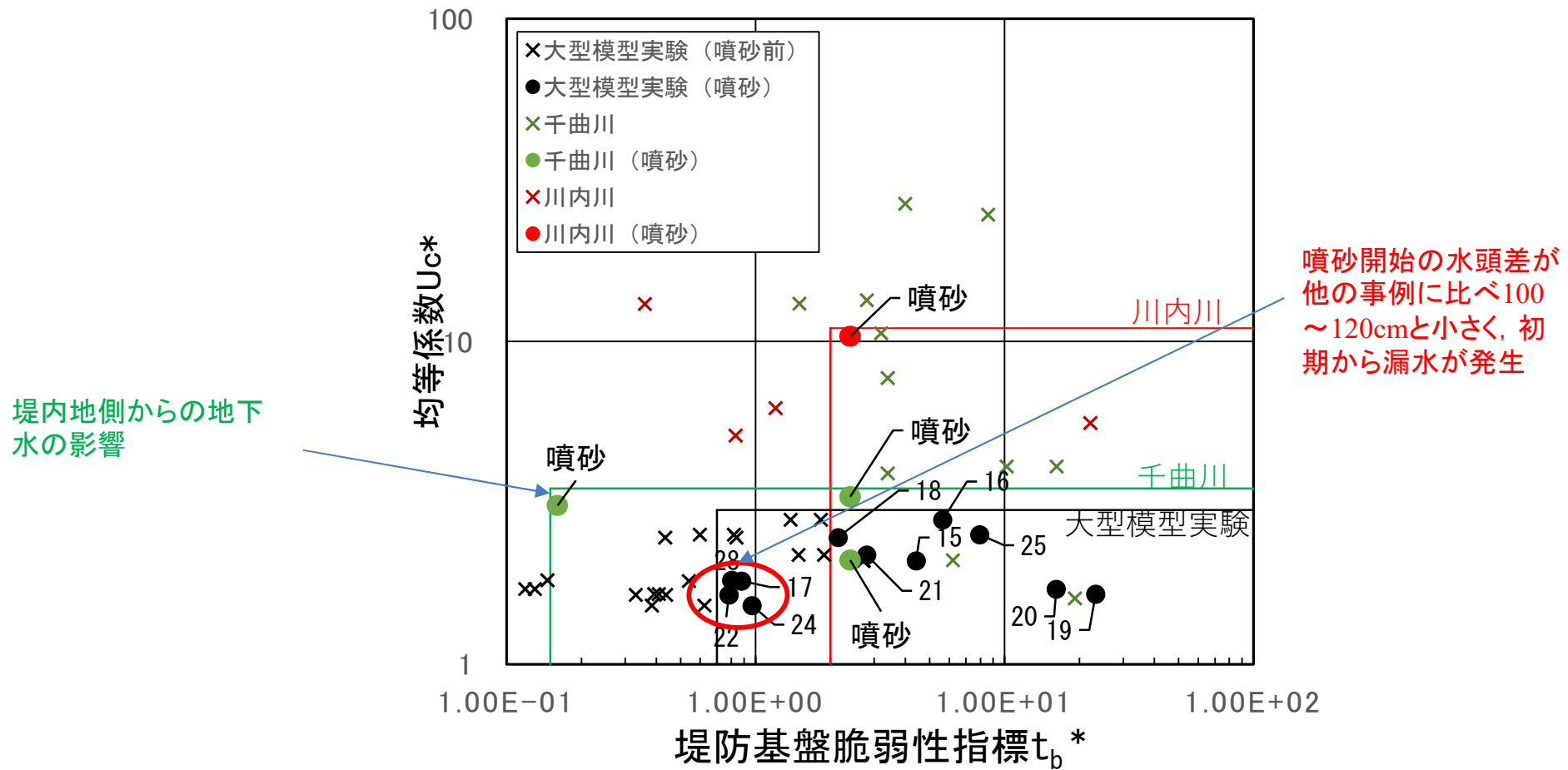
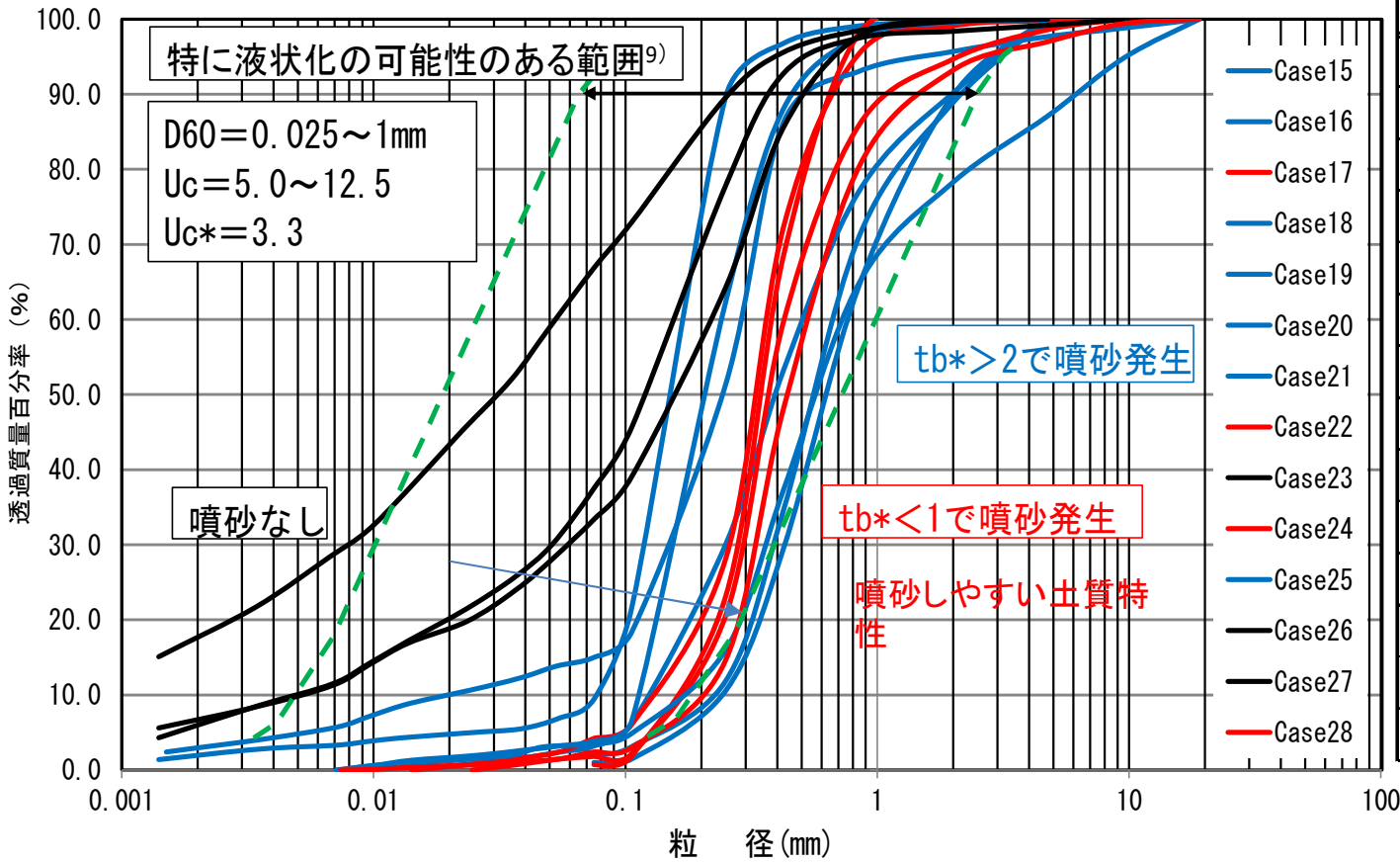


図- t_b^* と U_c^* の関係(川内川 (H18痕跡, 天端水位))

■ 検討結果

大型模型実験の土質特性から、噴砂しやすい粒度特性が存在する。



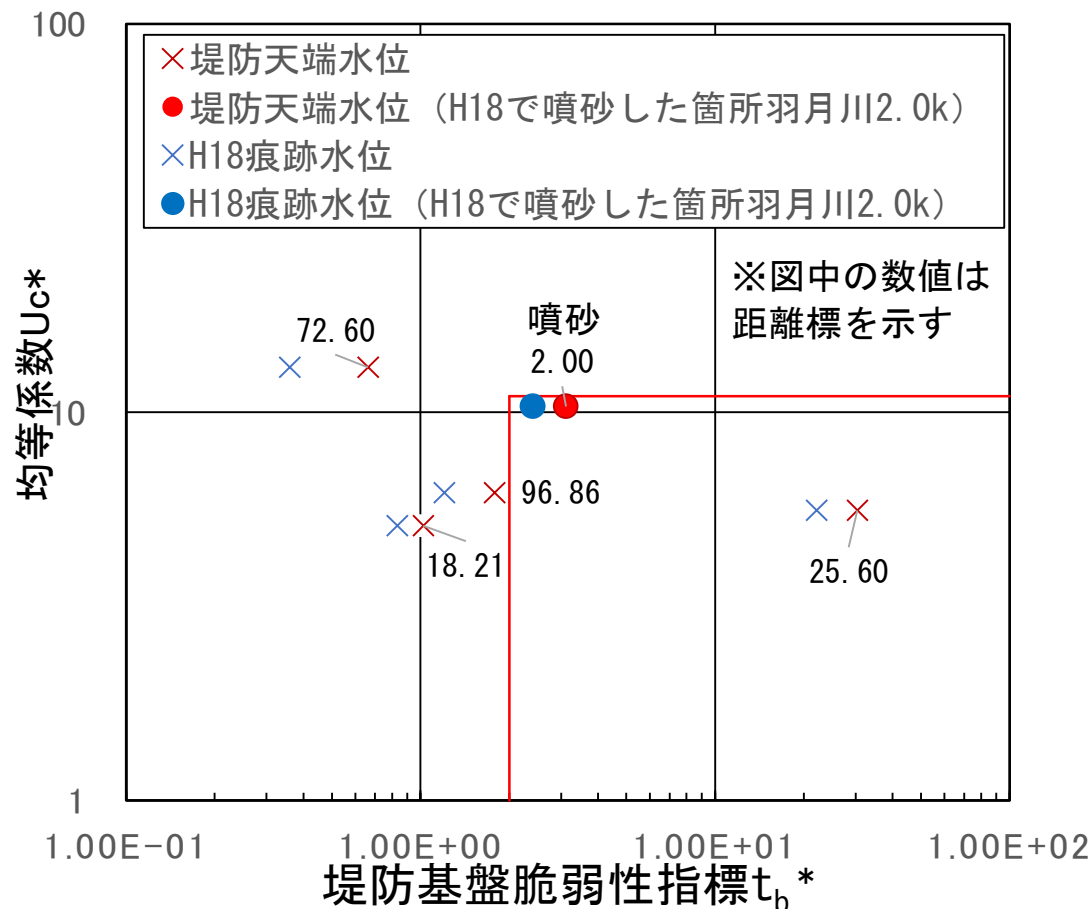
ケース (No)	地盤使用砂	噴砂有無	t_b^*
15	霞ヶ浦 (美浦)	○	4.42E+00
16	鬼怒川	○	5.64E+00
17	利根川	○	8.79E-01
18	江戸川 (シルト混り)	○	2.15E+00
19	霞ヶ浦 (麻生1)	○	2.32E+01
20	玉造	○	1.61E+01
21	鬼怒川	○	2.79E+00
22	霞ヶ浦 (麻生2)	○	7.82E-01
23	利根川下流	至らず	
24	長良川	○	9.68E-01
25	霞ヶ浦 (西の州)	○	7.95E+00
26	江戸崎	至らず	
27	小貝川 (吉沼)	至らず	
28	渡良瀬川	○	8.02E-01

6. 基盤浸透による堤防破壊危険性の評価

■ 堤防天端水位時の噴砂発生危険性評価

・H18痕跡水位はHWL程度であり、堤防天端と差は約1.5m程度であった。そのため堤防天端水位時はすべて t_b^* が大きくなるが、羽月川2.0k左岸及び川内川25.6k以外で、新たに $t_b^* > 2$ となる箇所はなかった。

一方、川内川96.86kは $U_c^* = 6.21$ となり羽月川2.0k左岸よりも噴砂しやすい土質特性であり、堤防天端水位時には $t_b^* = 1.78$ と高くなることから基盤浸透危険性が高まると考えられる。



- 各諸量の組み合わせで表現される無次元量 tb^* は、堤防基盤浸透現象に対する力学的相似条件であることが、川内川、千曲川及び大型模型実験データを用いて実証された. .
- 千曲川と大型模型実験の結果から、通常の河川では $tb^* > 1$ かつ $Uc^* < 3$ が噴砂発生危険性の高い範囲となる. .
- 一方、シラスから構成される川内川では、 $tb^* > 2$ かつ $Uc^* < 10$ が、噴砂発生危険性の高い範囲となる。このような差をもたらす要因として、浸透流によって細粒分が移動し、骨格となる角張った粒形のシラスにインターロッキング効果が現れたことで一般的なシラスよりもせん断強度が大きく、浸透流による骨格粒子の移動が生じにくい可能性があると考えられる。



川内川では、H18洪水の被災事例のデータが少ないことから、今後引き続きデータを収集し、調査が必要