

川内川流域の地形・地質を踏まえた堤防基盤浸透の考察

川内川流域，堤防脆弱性指標 t^* ，堤防基盤脆弱性指標 t_b^*

国土交通省

株式会社建設技術研究所 正会員 ○白石 芳樹

国土技術政策総合研究所 正会員 田端 幸輔

中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

1. はじめに

近年，超過洪水が増大し，これまで被害を受けてこなかった河川でも堤防破壊に伴う氾濫被害が発生している．これまで河川整備は河道内の流下能力の向上と堤防の築造に注力されてきたが，堤防は河川毎，箇所毎に異なる土質・形状で構成されていることから，特に浸透による破壊の危険な箇所を推測することが困難である．

川内川流域では，盆地と狭窄が連続し，火山活動に起因した互層構造の基盤を成しているため，大規模洪水時に堤体あるいは基盤浸透による堤防被災の危険性が懸念される．

本研究では，今後の河川整備に資するため，盆地・狭窄の配置，火砕流層範囲，ボーリング調査データに基づき，地形・地質の観点から流域の基盤構造の特徴を分析した．その上で，堤防脆弱性指標 t^* ，堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を評価し，堤体，基盤浸透による堤防被災の危険性を考察した．

2. 川内川流域の基盤構造の特徴

2.1 流域の概要

川内川流域は流域面積 1,600km²，総延長 137km で，上流域から河川沿いに小盆地が連なる（図-1）．川内川の河川沿いの地質構造は，主にシラスで構成されており，過去の噴火に応じ，加久藤カルデラ，阿多カルデラ，始良カルデラの火砕流堆積物での層序となっている．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し¹⁾，その後，栗野岳溶岩流によって堰き止められ，湖が形成され，一部は硬い溶結凝灰岩になっている．その後，鹿児島県の湾口部に位置する阿多カルデラ（約 10 万年前）が噴火し，加久藤火砕流堆積物を削った谷を埋めるように分布している．さらに始良カルデラ（約 2.5 万年前）を出現させた噴火によって入戸火砕流が噴出し堆積した²⁾．

また，中流にある鶴田ダム上流に大口盆地と加久藤盆地と言われる2つの小盆地が存在し，その間に狭窄部が連続し，洪水時に水位が上がりやすく流下能力上のネック箇所となっている．

川内川的主要洪水被害は平成 18 年 7 月洪水（梅雨前線）に発生しており，全水位観測所 15 箇所のうち 11 箇所で見測史上最高水位を観測，そのうち 4 箇所において

は計画高水位を超える水位を記録し，川内川の上流から下流に至る流域の 3 市 2 町（薩摩川内市，さつま町，伊佐市，湧水町，えびの市）の約 5 万人に避難勧告等が発令され，浸水面積約 2,777ha，浸水家屋 2,347 戸に及ぶ甚大な被害が発生している．主な被害は氾濫に加え，護岸や堤防の侵食が多い．一方，堤体の漏水やパイピング被害は 3 件³⁾と，浸透に起因する堤防被害は少ないものの，粘着性が低く透水性の高い土質が河川堤防の基盤を構成していることから，これまで被害がなかった箇所でも超過洪水時に被災するおそれがある．

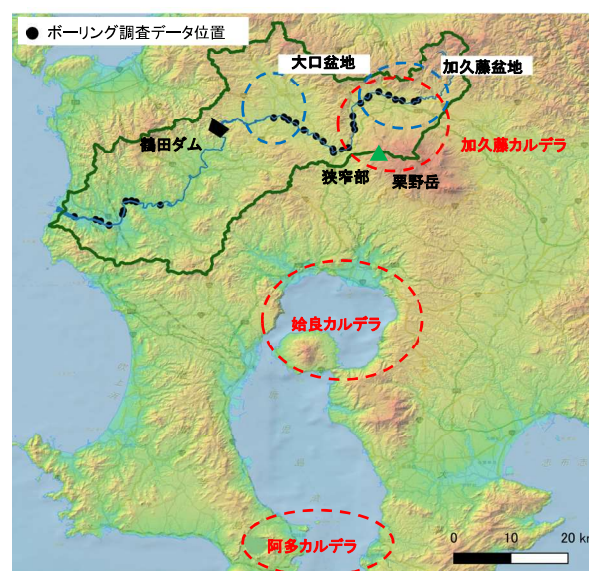


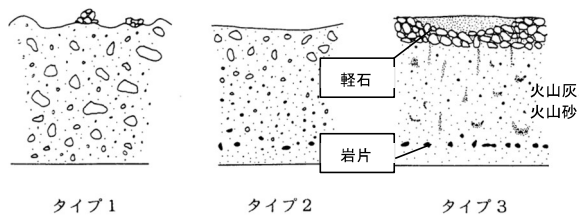
図-1 川内川流域の地形特徴とボーリング調査位置図

2.2 始良カルデラによる入戸火砕流堆積物の特徴

川内川の河川沿いに堆積する入戸火砕流堆積物は，シラス台地として現在の表層近くに露出しているが，1.6 万年前ごろから最終氷期が終わり，急激な温度上昇によって降雨量が増え，シラス台地が削られて段丘が形成された．火砕流堆積物は，火砕流のガス流速の違いにより堆積特性が分類されており⁴⁾，図-2 に示すような堆積の特徴を示す．入戸火砕流堆積物は，タイプ 3 に該当し，上層に軽石がほぼ水平に堆積する．

また，シラスは一次シラスと二次シラスに区分され，前者はシラス層を構成している火山灰，火山砂，軽石が一様に混合して成層を成していない一方，後者は湖面や流れなどの水の作用によってできた水成シラスと言われ，成層を成している．河川沿いの堤防直下の地盤は，主に二次シラスで構成されており，川や湖によ

Consideration of the levee foundation leakage based on the Topography and Geology of the Sendai River Basin Y. Shiraishi, CTI Engineering Co., Ltd. K. Tabata, National Institute for Land Infrastructure Management S. Fukuoka, Research and Development Initiative, Chuo University



タイプ1 タイプ2 タイプ3
図-2 3タイプの火砕流堆積物の特徴スケッチ⁴⁾

り水中で分級された結果として、礫・砂、シルト、粘土などの細粒層が水平に厚さ数 m で構成されている特徴があり、基盤浸透のリスクが高くなる条件となる互層構造となっている。そのため、河道内の水位が高くなれば、動水勾配が大きくなり基礎地盤浸透によるパイピング等のリスクが高くなるおそれがある。

図-1 に示すボーリング調査データのうち、平成 18 年洪水でのパイピング被害のあった羽月川 2.0k 左岸について、実際のボーリング調査結果を表-1 に示す。粒度分布を見ると、深度 6.2~6.5m 付近で上下層に対し、シルト分が少なく砂分が多くなっていることがわかる。この理由は川内川の盆地が火砕流堆積物によってカルデラ湖となり湖水堆積したことで成層堆積、つまり分級により粒径の大きなものと細かなものが分離された状態で堆積していることと関係しているといえる。

表-1 羽月川 2.0k 粒度分布

構成	採取深度(m) (上) (下)	N値	土粒子密度 (g/cm ³)	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	細粒含有率 (%)	透水係数 (m/s)
堤体	1 1.5	16	2.549	15.4	64.5	17	3.1	20.1	8.90E-06
	2 2.5	13	2.575	19.3	65.1	10.9	4.7	15.6	2.33E-05
	3 3.5	11	2.507	5.1	74.6	15.5	4.8	20.3	7.94E-06
不透水層	4 4.5	7	2.388	8.2	63.6	23	5.2	28.2	2.07E-06
軽石	6.2 6.5	7	2.507	38.8	53.4	5.1	2.7	7.8	3.23E-04
	8 8.5	25	2.634	63.9	27.4	7	1.7	8.7	7.01E-04
火山灰 火山砂	10 10.5	27	2.337	9.9	63.6	22.4	4.1	26.5	2.92E-06
	12 12.5	24	2.354	8.3	66.5	20.4	4.8	25.2	4.45E-06
	14 14.5	29	2.388	2.7	64.4	27.7	5.2	32.9	4.09E-06
	16 16.5	26	2.373	12.9	65.6	18.3	3.2	21.5	7.63E-06
	18 18.5	26	2.347	8.5	71.5	17	3	20	8.98E-06
	20 20.5	33	2.328	7.2	72.1	17.3	3.4	20.7	8.17E-06
	22 22.5	28	2.29	9.3	68.4	19.2	3.1	22.3	7.33E-06

3. 堤防脆弱性指標 t^* 、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の特性

3.1 検討手法

川内川は堤防及び基盤層が主に二次シラスで構成されていることから、堤体及び基礎地盤の浸透リスクは高いと考えられる。そのため、ボーリング調査が実施されている断面を対象に、近年の主要洪水である平成 18 年洪水における堤防脆弱性指標 t^* ⁶⁾、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* ⁷⁾ を調べ、法尻先の地質や被覆土厚との関係を整理し、堤体及び基礎地盤の浸透に対する危険性を考察した。

t^* 、 t_b^* はそれぞれ以下の式で表される。

$$t^* = \frac{5 k_t H T}{2 \lambda b^2} \quad (1)$$

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

ここに、H:最高水位と裏法尻高の差、b:表法の水際か

ら裏法先までの水平距離、T:水位が高水敷に冠水後の洪水継続時間、 λ :空隙率、 k_t :堤体の代表透水係数、 k_b :基礎地盤透水層の代表透水係数、D:裏法尻から基礎地盤透水層までの厚さ、L:表法先から裏法先までの水平距離である。

3.2 検討条件

t_b^* の検討において佐藤ら⁷⁾ が対象とした千曲川は、川内川と同様に大小の盆地から構成される。千曲川の中流は火山隆起による起源の丘陵で囲まれ、氾濫原は上流からの運搬土砂による扇状地で構成されており、地層構造が異なるが、 t_b^* が 0.3 を超えると被災が起りやすいという知見が得られていることから、本検討でも $t_b^* > 0.3$ の閾値を採用するものとした。また、佐藤ら⁷⁾ は砂層が持つせん断抵抗角 ϕ に均等係数 Uc^* 、粘性土層厚 Dc と砂層の層厚の逆数 $1/Ds$ を乗じた値を用いて、すべり発生の有無を判定しているが、本検討で対象とした川内川では、 Uc^* 等のデータが不足していることから上記値の算出が困難であった。ただし、図-2 のタイプ3のような基盤特性を有する川内川では、高透水層が直ちに被圧し、その上の難透水性被覆土を破壊することで漏水、噴砂、パイピングのいずれかの被害を生じさせる危険性があると考えられる。よって、被覆土厚、被覆層の透水係数、被覆土に作用する鉛直方向の動水勾配 $(H+D)/D$ に着目し、これらと t_b^* を総合的に考察することで基盤浸透の危険性を評価するものとした。なお、 t^* については、 $t^* = 0.01 \sim 0.1$ で裏法滑り、 $t^* \geq 0.1$ で決壊⁹⁾ の基準を採用した。

ボーリング調査箇所 (43 箇所) の堤防および堤内形状は、レーザプロファイラデータから読み取った。また、透水係数はボーリング深度に応じた地質データから Creager の式によって各土層の透水係数を取得した。水位には平成 18 年洪水の痕跡水位を用いた。

3.3 平成 18 年洪水の検証

痕跡水位縦断面図を図-3 に示す。 t^* 、 t_b^* の関係図を図-4 に示す。川内川の河川勾配は基盤の露出する箇所では急勾配となり、盆地では緩やかとなるため階段状の河川縦断面形状を有している⁸⁾。

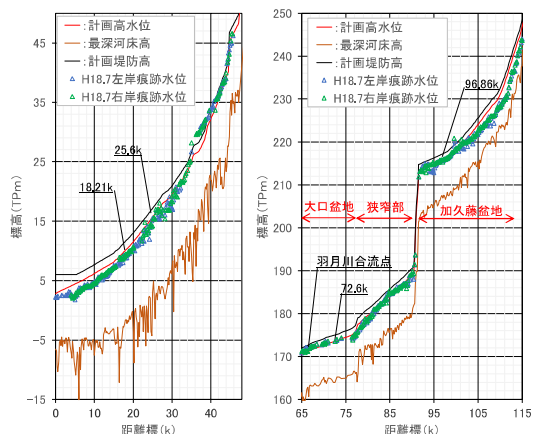


図-3 川内川痕跡水位縦断面図(H18)

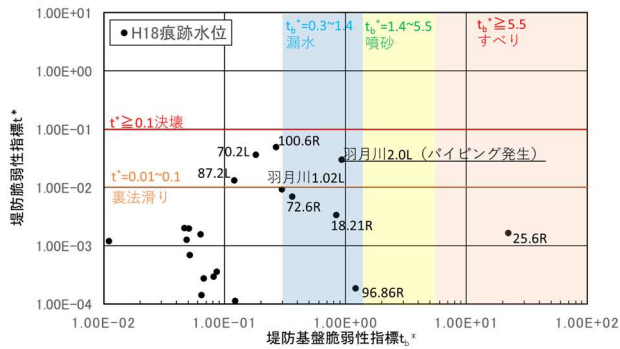


図-4 t_b^* と t^* の関係(川内川 H18 痕跡水位)

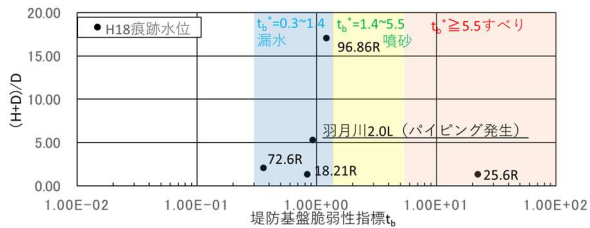


図-5 t_b^* と $(H+D)/D$ の関係(川内川 H18 痕跡水位)

表-2 $t_b^* > 0.3$ 以上の諸定数(川内川 H18 痕跡水位)

距離標	河川 (km)	場所	被災	t_b^*	H+D (m)	D (m)	透水層 k_b (m/s)	不透水層 k_u (m/s)	透水層 Uc* /D
川内川	18.21	右岸	—	8.33E-01	7,346	5.3	4.86E-04	1.05E-07	50 1.39
	25.60	右岸	—	2.21E+01	7,314	5.3	1.40E-02	3.19E-06	20 1.38
	72.60	右岸	—	3.59E-01	2,733	1.3	1.23E-03	1.21E-07	25.2 2.10
	96.86	右岸	—	1.21E+00	5,121	0.3	4.27E-03	6.11E-08	21.4 17.07
羽月川	2.00	左岸	パイピング	9.26E-01	2,665	0.5	3.23E-04	2.07E-06	— 5.33

噴砂、パイピングが発生した羽月川 2.0k 左岸では $t_b^* = 0.926$ となり、佐藤らが示した危険領域 ($t_b^* > 0.3$) に含まれる。また、表-2 に示すとおり、 $(H+D)/D$ の値が他の箇所よりも高くなっている。一方、 $t_b^* = 22$ と高い値を示す 25.6k では、 $(H+D)/D = 1.38$ と小さく、不透水層が 5.3m と大きい(図-8 参照)。96.86k では $(H+D)/D = 17.07$ とさらに高い値であるが、不透水層の透水係数が $6.11E-08$ と他の箇所に比べて 1~2 オーダー低い。現時点では明確な閾値を設定することは困難であるが、被覆層が厚い、あるいは被覆土の透水係数が小さいことに加えて $(H+D)/D$ が小さい場合は、基盤浸透の危険性は小さい可能性があることが分かる。

t^* については、堤体漏水や裏法すべりの被災事例はないが、4箇所では 0.01 以上を示している。これには羽月川 2.0k 左岸も含まれており、堤体浸透に対しても危険であった可能性があることが分かった。

4. 大きな外力が作用したときの堤防・基盤の浸透危険性

4.1 ボーリング調査実施断面における危険性

計画規模相当ならびに超過洪水相当の外力に対する堤体・基盤浸透リスクを評価するため、3章で示したボーリング調査が実施された断面において、計画高水位及び堤防天端水位に対する t^* と t_b^* を算定した。結果を図-6 に示す。この中で基盤層が互層構造であると推測される大口盆地と加久藤盆地のボーリング調査箇所を

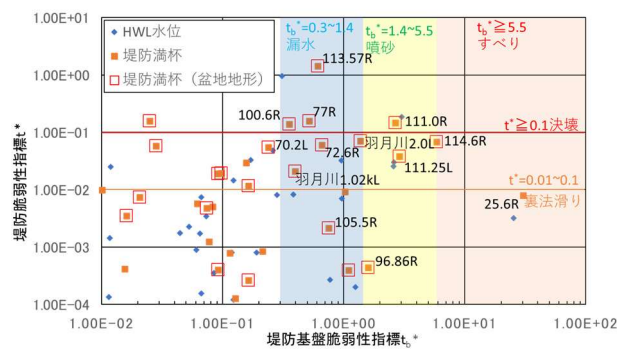


図-6 t_b^* と t^* の関係(川内川 天端水位・HWL)

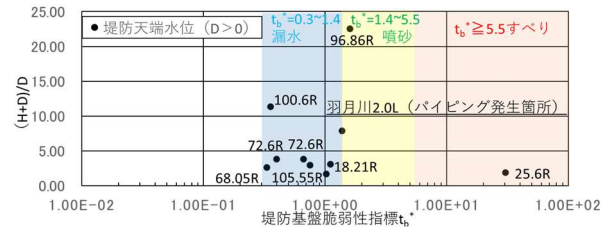


図-7 t_b^* と $(H+D)/D$ の関係(川内川 天端水位・HWL)

表-3 $t_b^* > 0.3$ 以上の諸定数(川内川 天端水位・HWL)

距離標	河川 (km)	場所	被災	t_b^*	H+D (m)	D (m)	透水層 k_b (m/s)	不透水層 k_u (m/s)	透水層 Uc* /D
川内川	18.21	右岸	—	1.02E+00	9,02	5.3	4.86E-04	1.05E-07	50 1.70
	25.60	右岸	—	3.04E+01	10,062	5.3	1.40E-02	3.19E-06	20 1.90
	68.05	右岸	盆地	3.32E-01	8,792	3.3	5.00E-04	9.03E-08	46 2.66
	72.60	右岸	盆地	6.63E-01	5,04	1.3	1.23E-03	1.21E-07	25.2 3.88
	96.86	右岸	盆地	1.59E+00	6,773	0.3	4.27E-03	6.11E-08	21.4 22.58
	100.60	右岸	盆地	3.55E-01	3,302	0.29	2.92E-03	8.07E-07	— 11.39
	105.55	右岸	盆地	7.51E-01	4,005	1.35	4.18E-03	2.84E-07	80.4 2.97
	107.60	右岸	盆地	1.10E+00	4,126	1.32	4.57E-03	6.46E-09	— 3.13
羽月川	1.02	左岸	盆地	3.97E-01	5,814	1.5	1.38E-04	8.10E-06	— 3.88
	2.00	左岸	盆地	1.37E+00	3,954	0.5	3.23E-04	2.07E-06	— 7.91

四角のプロットで示したところ、 $t_b^* > 0.3$ となる箇所(14箇所)のうち、12箇所が盆地に位置することが確認される。また、図-7に $(H+D)/D$ と t_b^* の関係を、表-3 に t_b^* が 0.3 を越えたデータのうち $D > 0$ となる箇所の詳細を示す。 $(H+D)/D$ が、H18年洪水での羽月川 2.0k 地点の値である 5.33 (表-2 参照) を越える箇所は、前述の 96.86k に加え、100.6k となるが、ここは背後に工場があり盛土造成されているため、浸透路長が長くなることから基盤浸透による漏水の可能性は低い。しかし、これら以外にも 107.6k 等、 $(H+D)/D$ の値が増加する箇所が外力増大に応じて増えてきていることが分かる。 t^* についても、16箇所では 0.01 以上を示しており、そのうち 15箇所が盆地部に位置している。つまり、狭窄部上流の盆地に整備された堤防は、水位の上昇とともに洪水継続時間の増大により、堤体浸透と基盤浸透の両方の危険性が高まりやすいと言える。

4.2 ボーリング調査実施断面以外の箇所の危険性

図-8 に 25.6k のボーリング調査データと横断図、図-9 に 25.6k 付近の地質縦断図を示す。これより透水層となっている地質は透水性の高い砂礫層が河床高付近に存在している。この層は始良層相当層(図-9の緑色着色)であり、N値が高いことから典型的なシラス軽石と推

測され、その上部に入戸火砕流層の粒度の細かなシルト混じり砂（図-9 の桃色着色）が堆積している。このシラス軽石の透水層の上部に堆積した砂層は二次シラスではなく分級されていない不透水層であり、約6m程度である。先に示した25.6kは、この地点に位置する。一方、25.6kより約800m程度上流の地質構成を見ると、不透水層となる入戸火砕流層の砂層が、上流に向かうに従い薄くなっていることがわかる。平成18年の痕跡水位が堤防天端高より2.5m程度低いことを考慮すると、このような箇所は今後、基盤浸透による被災の可能性が高い箇所といえる。

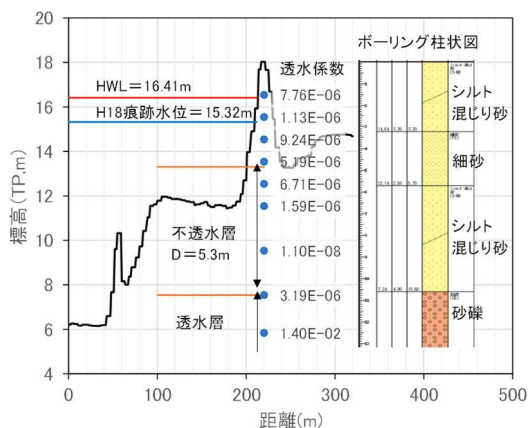


図-8 25.6k 右岸のボーリング調査と横断面

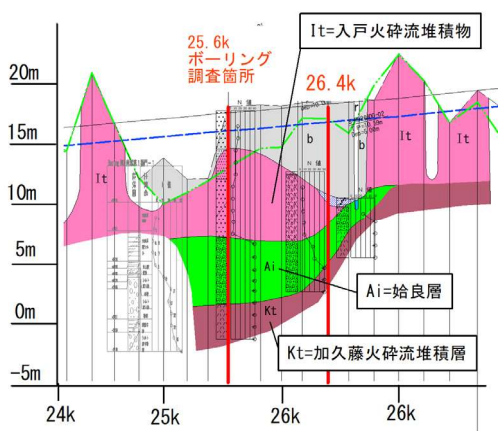


図-9 25.6k 右岸付近の地質縦断面

4.3 狭窄部の考察

図-1 に示す狭窄部でのボーリング調査データのうち、 t_b^* が大きな値を示す事例は1箇所のみであった。狭窄部は同じ火砕流層でも溶結凝灰岩に囲まれ、川幅が狭く、勾配が大きいため河川水位が上がりやすく流速も大きくなる河道形状となっている⁹⁾。そのため、上流から流れてきた二次シラスは粒径の大小の材質が成層とならず一様にばらついて堆積していると想定される¹⁰⁾。また痕跡水位（図-3）も高い傾向であるため、河川改修を重点的に行われ、流下能力の確保とともに堤防の質的強化が進んでいると推測されることから、基盤浸透に対する危険性は盆地地形に比べ低いと考えられる。

5. まとめ

本研究では川内川の本川及び支川（国管理区間）の一部のボーリング調査データが存在する箇所でのシラス堆積の特性と t^* 、 t_b^* との関連性について考察した。そして主に盆地地形では、湖水堆積による二次シラスの分級で透水層の上に不透水層が存在する互層構造となり、 t^* 、 t_b^* の値が高くなる傾向を示した。特に周囲の段丘から多く小河川が合流する箇所では、水位も上がりやすくなり基盤浸透破壊及び堤体の浸透破壊のリスクが高まると思われる。なお、羽月川の支川は県管理河川の合流が多く、内外水氾濫が頻発している区間であり、基盤浸透や堤体浸透が発生する可能性が高い。そのため、今後支川のボーリング調査データと被災事例を調査し、検証を実施する必要がある。

これらの知見は火砕流堆積物を基盤とする他の河川でもその成り立ちを踏まえた層層を考慮することで堤体や基盤の浸透危険度リスクの判定を行うことが可能と考えられる。特に今後、ボーリング調査データのない箇所では推定数を推定できれば、 t^* 、 t_b^* を算出できるためこれまで被害が発生していないが、危険となる箇所の把握に役立つと考えられる。

参考文献

- 1) 横山勝三：シラス学，古今書院，2003。
- 2) 尾崎次男：加久藤盆地の水文地質，防災科学技術総合研究報告，26号，pp113-118，1971。
- 3) 田中勇一：H18.7 川内川における激甚災害-再度災害防止に向けて-，九州技報，第41号，2007。
- 4) Wilson, C.J.N.：The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows: an experimental approach. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 8, 231-249, 1980。
- 5) 長岡信治：加久藤カルデラ湖（加久藤盆地）に流入した阿多火砕流と入戸火砕流-火砕流の水中堆積と霧島火山の溶岩流による変形-，第四紀露頭集，1996。
- 6) 田端幸輔，堀内崇志，福岡捷：狭窄部と盆地部が連続する千曲川における大規模洪水流下時の河道貯留・堤防浸透破壊危険性の評価と今後の治水整備のあり方，河川技術論文集，第25巻，pp.553-558, 2019。
- 7) 佐藤豊，福岡捷二：堤防脆弱性指標 t^* ，堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と土質特性を用いた堤防裏すべり発生の検討，第9回河川堤防技術シンポジウム，pp.79-82, 2021。
- 8) 岩松暉，福重安雄，郡山榮，シラスの応用地質学的諸問題：地学雑誌 98-4，pp379-388，1989。
- 9) 服部信彦，川内川の洪水と鶴田ダムの意義。地理学評論，Vol.40, No.12, p.693-706，1967。
- 10) 荒牧重雄：加久藤盆地の地質—えびの・吉松地域の地震に関連して，地震研究所集報，Vol.46, No.6, 1325-1343，1968。