

## 破堤氾濫域における土砂堆積と湛水の状況から概算される氾濫水密度\*

中央大学研究開発機構 松富英夫  
岡山理科大学理学部 鎌滝孝信

### 1. はじめに

氾濫水密度 $\rho$ は氾濫域における構造物への浮力を含む流体力<sup>1)</sup>や土砂堆積と密接に関係する。氾濫による土砂堆積の特性情報は沿岸域における津波氾濫と河川氾濫の区別<sup>2)</sup>、ひいては歴史津波の規模特定などに必要である。

松富・鎌滝<sup>3)</sup>は2018年の岡山県倉敷市真備町における小田川の複数地点での破堤による氾濫域の湛水状況と湛水排水後の土砂堆積厚 $Z$ に関する現地調査データを用いて氾濫水密度 $\rho$ を概算する方法を提示した。

2019年10月12～13日の台風第19号豪雨により、東日本と北日本の広範囲で洪水の破堤氾濫が多発した<sup>4)</sup>。例えば、長野県の一級河川千曲川の左岸堤防57.5 km地点<sup>5)</sup>や宮城県の一級河川吉田川の左岸堤防20.9 km地点<sup>6)</sup>で大規模な破堤氾濫が発生した。これらの破堤氾濫域における湛水状況や土砂堆積厚 $Z$ に関する現地調査データを収集すれば、提示概算法による氾濫水密度 $\rho$ の概算や破堤氾濫域における土砂堆積特性の高度化が期待できる。

本研究は千曲川と吉田川の破堤氾濫域における最大氾濫浸水深 $h$ 、土砂堆積厚 $Z$ 、堆積土砂の層構造・粒度に関する現地調査データや湛水情報を収集し、提示概算法による氾濫水密度 $\rho$ の概算や破堤氾濫域における土砂堆積特性の高度化を目的とする。

### 2. 現地調査

千曲川の破堤氾濫域における現地調査は2019年11月8～11日、吉田川の破堤氾濫域における現地調査は11月18～20日である。千曲川調査時の天気は晴れや曇り、吉田川調査時の天気は夜間に小雨が降ったりした曇りである。

主な現地調査項目は破堤氾濫域内の各調査地点 (Stと略記) における最大氾濫浸水深 $h$  (=最大氾濫浸水痕跡位—土砂堆積地点地表位)、土砂堆積厚 $Z$ 、堆積土砂の層構造と粒度である。調査地点は氾濫域全体に偏りなく行き渡るように心がけ、氾濫流を急変させる家屋などの構造物が近場でない地点とした。各調査地点で土砂堆積状況を2箇所以上調べ、基本的に代表的なもの1つを調査した。堆積土砂の層構造は目視と触診で判断し、土砂堆積厚が薄いもの (3層は3 cm以下、2層は2 cm以下) を除き層毎に土砂を採取した。測量には自動レベルと標尺を用いた。

図-1と2に現地調査地点 (●) と破堤地点 (×) を示す。図中のアラビア数字は調査地点番号である。図-2におい

て、St.1～4と10の破堤氾濫域を氾濫域I、St.5～9の破堤氾濫域を氾濫域IIと呼ぶことにする。

### 3. 土砂堆積

本研究では堆積土砂の成分を既報<sup>3)</sup>と同様に泥 (シルト・粘土) と砂に大別して論じる。表-1と2に各破堤氾濫域の各調査地点における調査結果例を示す。粒径 (中央粒径 $d_{50}$ ) は層毎の評価値の算術平均値である。堆積土砂の成分は既報と同じで泥が主体である。写真-1に千曲川の破堤氾濫域のSt.6における堆積土砂の層構造を示す。

#### (1) 千曲川

千曲川は新潟・長野県境を起点とし、幹川流路延長214 km、流域面積7,163 km<sup>2</sup>の一級河川である。河川整備基本方針における治水安全度は1/100、計画降水量は186 mm/2日、長野市穂保地先の破堤地点 (左岸57.5 km) の下流6.1 kmに位置する立ヶ花基準地点における基本高水流量と計画高水流量は11,500 m<sup>3</sup>/sと9,000 m<sup>3</sup>/sである<sup>7)</sup>。

今回、破堤地点上流の佐久市塩名田雨量観測所では24時間最大雨量が273 mmに達し<sup>8)</sup>、流域平均の総雨量 (3日間雨量、22観測地点<sup>9)</sup>の算術平均) は207 mmである。

千曲川における破堤箇所は長野市穂保地先の1箇所、破堤地点では10月13日00時55分に越水が確認された。左岸57.4 km地点に設置された危機管理型水位計の記録によれば<sup>8)</sup>、02時40分に最大の水位と越流水深0.8 mに達した。破堤は05時30分、最終的な破堤延長は約70 mである<sup>8)</sup>。

図-3左に各調査地点の最大氾濫浸水深 $h$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係を示す。図中の数値は調査地点番号で (図-1、表-1参照)、赤点線囲いは砂を含む土砂堆積 (以下同じ) である。図中には土砂堆積厚を最大氾濫浸水深の0.5、1、2%とした場合の関係が破線で示されている。2%は2011年東北地震津波による仙台平野の土砂堆積で評価された平均値である<sup>9)</sup>。図から、1) St.6, 8, 12, 19といった破堤地点に比較的近い地点 (直線距離 $L$ で1 km以内。後述の図-4左参照) を除けば、土砂堆積厚は最大氾濫浸水深の1%程度以下であること、2) 堤外地 (高水敷) の堤防近傍沿いの土砂堆積は厚い傾向、すなわち土砂堆積厚・最大氾濫浸水深比 $Z/h$ が津波によるものとはほぼ同じ2%程度であることが判る。St.6, 8, 12, 19において土砂堆積が厚い傾向の要因として、道路沿いの水田内の道路縁という調査地点の選定も考えられる。

\* Density of inundation water roughly estimated from the state of sediment deposit and ponding in flooded area due to the breaking of river embankment by Hideo MATSUTOMI and Takanobu KAMATAKI

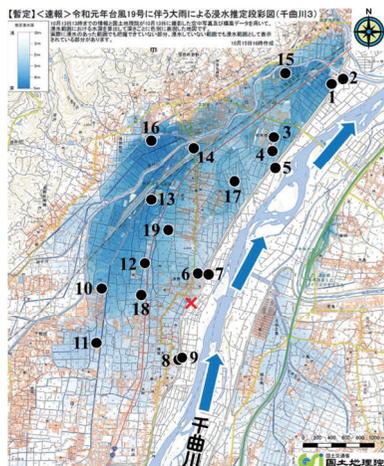


図-1 長野市穂保地先での破堤による氾濫域における氾濫浸水深や土砂堆積厚などの現地調査地点 (国土地理院発表の浸水推定段彩図<sup>9)</sup>に加筆・修正。●：現地調査地点，×：破堤地点，アラビア数字は現地調査地点番号)

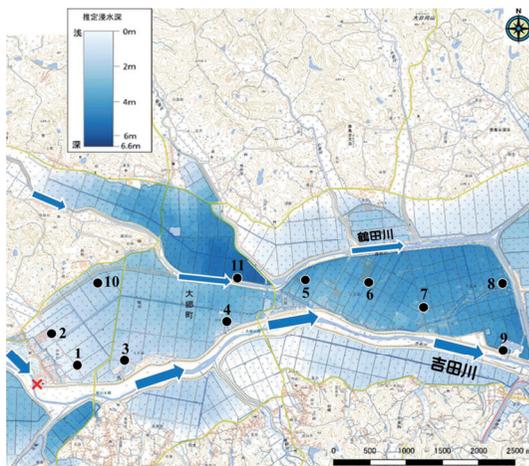


図-2 宮城県大郷町粕川地先での破堤による氾濫域における氾濫浸水深や土砂堆積厚などの現地調査地点 (国土地理院発表の浸水推定段彩図<sup>9)</sup>に加筆・修正。●：現地調査地点，×：破堤地点，アラビア数字は現地調査地点番号)

表-1 千曲川の破堤氾濫域における現地調査結果例 (d)：乾燥，(w)：湿潤，粒径：レーザー分析器で評価，\*：平均値評価で除外)

調査地点	浸水痕跡場所	土砂採取場所	堆積土砂成分	浸水深 h(m)	土砂堆積厚 Z(cm)	Zh (%)	直線距離 L(m)	粒径 (μm)	堆積層数
St.1	浅川排水機場建屋壁面	果樹園内	泥	4.25	0.3-0.5(d)	0.07-0.12	3,650	28.4	1
St.2	堤防裏法面	高水敷	泥	7.65	14(w)	1.83	3,750	21.7*	1
St.3	下水処理場建屋壁面	処理場内	泥	2.48	2.7-3.0(d)	1.09-1.21	2,510	19.1	3
St.4	下水処理場建屋壁面	果樹園内	泥	3.02	1.0-1.3(d)	0.33-0.43	2,370	14.6	1
St.5	堤防天端	高水敷	泥	5.78	10(w)	1.73	2,210	27.1*	1
St.6	平屋土壁住家壁面	樹園空地	砂+泥	1.83	8.5(w)	4.64	380	100.0*	3
St.7	堤防天端	高水敷	砂	6.17	9.5(w)	1.54	390	109.6*	2
St.8	物置小屋壁面	樹園空地	泥	0.97	5(w)	5.15	880	28.4	3
St.9	堤防裏法面	高水敷	砂+泥	5.39	7(w)	1.30	850	57.1*	2
St.10	倉庫壁面	水田内	泥	3.59	2.8(w)	0.78	1,330	12.5	3
St.11	JA倉庫壁面	水田内	泥	2.15	1.5(w)	0.70	1,500	7.6	3
St.12	製作所建屋壁面	休耕地内	泥	3.36	5-14(w)	1.49-4.17	850	18.8	1
St.13	橋桁裏板面	水田内	泥	4.94	4(w)	0.81	1,590	17.2	1
St.14	長沼排水機場建屋壁面	樹園空地	泥	4.25	0.7(d)	0.16	2,160	13.2	3
St.15	2階建て住家壁面	樹園空地	泥	4.36	1.5-3(d)	0.34-0.69	3,480	13.1	2
St.16	JR鉄道路路盤法面	水田内	泥	4.38	0.7-0.9(w)	0.16-0.21	2,410	6.1	1
St.17	果樹園内倉庫内側壁面	果樹園内	泥	2.81	1.5-2(w)	0.53-0.71	1,750	8.2	3
St.18	住家壁面	水田内	泥	2.86	3.3(w)	1.15	740	-	4
St.19	住家壁面	樹園空地	泥	3.19	6(w)	1.88	1,040	-	1

表-2 吉田川の破堤氾濫域における現地調査結果例 (d)：乾燥，(w)：湿潤，-：測定せず)

調査地点	浸水痕跡場所	土砂採取場所	堆積土砂成分	浸水深 h(m)	土砂堆積厚 Z(cm)	Zh (%)	直線距離 L(m)	粒径 (μm)	堆積層数
St.1	住家壁面	水田内	砂	2.72	1.8-2.2(d)	0.66-0.81	590	-	1
St.2	ビニールハウス壁面	水田内	泥	1.44	3.1(w)	2.21	700	-	2
St.3	牛舎壁面	水田内	泥	1.60	1.2(d)	0.75	1,250	-	1
St.4	牛舎壁面	水田内	泥	1.79	0.7(d)	0.39	2,720	-	2
St.5	ビニールハウス壁面	水田内	泥	2.57	0.1-0.2(d)	0.04-0.08	3,950	-	1
St.6	ビニールハウス壁面	水田内	泥	2.89	0.1(d)	0.03	4,770	-	3
St.7	住家壁面	水田内	泥	2.82	1.0(w)	0.35	5,580	-	2
St.8	物置小屋壁面	水田内	砂+泥	3.28	3.0(d)	0.91	6,610	-	2
St.9	堤防裏法面	水田内	泥	3.08	3.4(w)	1.10	6,530	-	2
St.10	ビニールハウス壁面	水田内	泥	2.58	1.8-2.0(w)	0.70-0.78	1,810	-	1
St.11	堤防裏法面	水田内	泥	3.17	0.6(d)	0.19	3,060	-	1

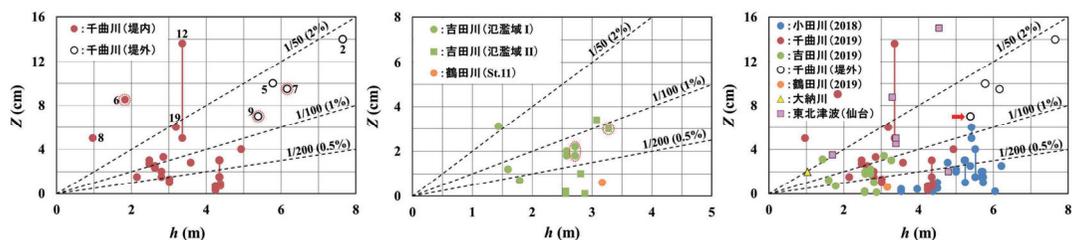


図-3 最大氾濫浸水深 $h$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係 (左: 千曲川, 中央: 吉田川, 右: 全体。赤点線囲いは砂を含む土砂の堆積)

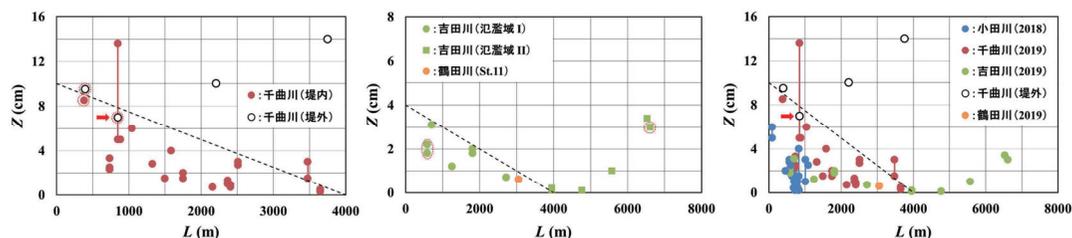


図-4 破堤地点からの直線距離 $L$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係 (左: 千曲川, 中央: 吉田川, 右: 全体。赤点線囲いは砂を含む土砂の堆積)



写真-1 千曲川の破堤氾濫域のSt.6における堆積土砂の層構造 (地表から泥層[22 $\mu$ m]+砂層[225 $\mu$ m]+泥層[53 $\mu$ m]の3層)

図-4左に各調査地点の破堤地点からの直線距離 $L$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係を示す。直線距離 $L$ はGoogle Earthの距離測定機能を用いて評価している。図中には両者の関係に対する暫定的な上限直線が破線で示されている。赤矢印のデータは破堤地点上流の堤外地で得られたもので、以下でも同じである。図から、1) 土砂堆積は破堤地点から離れるにつれて薄くなること、2) 堤外地の土砂堆積は逆に厚くなっていることが判る。1)の傾向は2018年西日本豪雨において小田川の破堤氾濫域で得られた土砂堆積の傾向と同じである<sup>3)</sup>。St.12で得られた2つの土砂堆積の一方は直線距離の割に厚い。両データは道路沿いの同じ水田内のもので、厚い方は道路沿いの縁近辺、薄い方は中心寄り得られている。2)は堤外地の流況が、堤防の線形も関係して、堆積傾向のもの(堰上げ背水)で、流下方向へ徐々に変化したことによると考えられる。

## (2) 吉田川

吉田川は一級河川鳴瀬川の右一次支川で、幹川流路延長53 km、流域面積350 km<sup>2</sup>を有する。河川整備基本方針における治水安全度は1/100、計画降水量は335 mm/2日、

大郷町粕川地先の破堤地点(左岸20.9 km)の上流7 kmに位置する落合基準地点における基本高水流量と計画高水流量は2,300 m<sup>3</sup>/sと1,600 m<sup>3</sup>/sである<sup>10)</sup>。

今回、宮城県加美町の青野雨量観測所では10月12日00時からの48時間雨量が410 mmに達し<sup>4)</sup>、流域平均の総雨量は(8観測地点の算術平均<sup>11,12)</sup>)は303 mmである。

吉田川における破堤箇所は大郷町粕川地先の1箇所、破堤地点では10月13日03時頃に越水が確認された<sup>11)</sup>。洪水水位は破堤地点の計画高水位を6時間程度、堤防天端高を4時間程度超過し、最大越流水深は0.4 mに達した<sup>11)</sup>。破堤は07時50分頃、最終的な破堤延長は約100 mである<sup>11)</sup>。

図-3中央に各調査地点の最大氾濫浸水深 $h$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係を示す。図中、●は氾濫域I、■は氾濫域II、●は左二次支川鶴田川左岸側の堤内地で得られたデータである。図から、破堤地点に比較的近い地点(直線距離 $L$ で1 km以内。後述の図-4中央参照)を除けば、土砂堆積厚は最大氾濫浸水深の1%程度以下であることが判る。

図-4中央に各調査地点の破堤地点からの直線距離 $L$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係を示す。図中には両者の関係に対する暫定的な上限直線が破線で示されている。図から、氾濫域Iでは破堤地点から離れるにつれて、土砂堆積が薄くなり、氾濫域IIでは破堤地点から離れるにつれて、土砂堆積が厚くなっていることが判る。破堤氾濫域を南北に走る県道146号が低堤高の堤防の役割を果たすと判断して二分したが、土砂堆積厚の傾向も二分された。これには県道の存在や細長い緩勾配(約1/3,000<sup>11)</sup>)の地形、排水に11日半も要したこと(後述)、St.9の近辺に排水機場があり、土砂が集まり易いことが関係していよう。

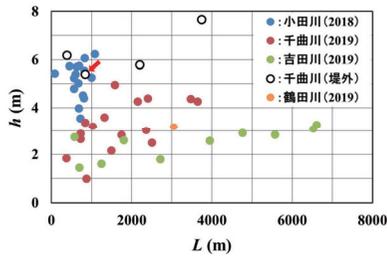


図-5 破堤地点からの直線距離 $L$ と最大氾濫浸水深 $h$ の関係

### (3) 全体

図-3右に小田川、千曲川、吉田川の各破堤氾濫域における各調査地点の最大氾濫浸水深 $h$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係を示す。図中には2017年秋田豪雨における雄物川の左一次支川大納川<sup>13)</sup>や2011年東北地震津波における仙台平野<sup>9)</sup>の氾濫域で得られたデータも示されている。図から、破堤地点近くで例外的な厚さのデータが存在するが、全体的に洪水の破堤氾濫による湛水後の土砂堆積厚 $Z$ は最大氾濫浸水深 $h$ の1%程度以下であることが判る。

図-4右に小田川、千曲川、吉田川の各破堤氾濫域における各調査地点の破堤地点からの直線距離 $L$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係を示す。図中には両者の関係に対する暫定的な上限直線が破線で示されている。図から、直線距離 $L$ に対する土砂堆積厚 $Z$ の低減割合は破堤氾濫域毎で異なり得るが、低減傾向ほどの破堤氾濫域でも同じことが判る。ただし、破堤氾濫域の状況次第で例外があり得る。

## 4. 湛水

### (1) 最大の氾濫浸水深と氾濫浸水位の空間分布

図-5に小田川、千曲川、吉田川の各破堤氾濫域における各調査地点の破堤地点からの直線距離 $L$ と最大氾濫浸水深 $h$ の関係を示す。図から、1) 小田川の場合、13調査地点の最大氾濫浸水深は大きく散らばっているが、直線距離が増すにつれて大きくなる傾向が認められること、2) 千曲川の場合、堤外地を除いた15調査地点の最大氾濫浸水深は散らばっているが、直線距離が増すにつれて大きくなり、その算術平均値は3.22 mであること、3) 吉田川の場合、St.11を除いた10調査地点の最大氾濫浸水深は直線距離が増すにつれて明瞭に大きくなり、その算術平均値は2.48 mであることが判る。

図-6に小田川、千曲川、吉田川の各破堤氾濫域における各調査地点の破堤地点からの直線距離 $L$ と最大氾濫浸水位 $E$  (TP基準) の関係を示す。最大氾濫浸水位は国土地理院のDEMデータ<sup>14)</sup>と最大氾濫浸水深 $h$ から評価している。図から、最大氾濫浸水位 $E$ は、吉田川での場合のように破堤氾濫域が細長い緩勾配の場合を除けば、ほぼ同様であることが判る。吉田川での場合にしても、氾濫域IIではほぼ同様となっている。

### (2) 湛水部立体形状の単純化

湛水部における諸量・諸事象を単純化(平面空間平均化)して論じるため、湛水部立体形状を単純化する。

最大氾濫浸水深 $h$ の直線距離 $L$ に対する分布は破堤氾濫域の地形や破堤地点数、氾濫流況に依存する。4.(1)節で論じた最大の氾濫浸水深と氾濫浸水位 $E$ の直線距離に対する分布状況や図-1と2に示された国土地理院発表の浸水推定段彩図<sup>9)</sup>から、千曲川と吉田川での湛水部は各々直径部の高さ(深さ)が0の斜切円柱と一様幅の緩傾斜した矩形と単純化できよう。

各湛水部を上述のように単純化した場合、各湛水域における最大湛水面積 $A_m$ のときの最大空間平均湛水深 $h_{am}$ は千曲川では地形勾配が緩いので $4.94 \text{ m}^2 = 2.47 \text{ m}$ (水際水深0 mの考慮の仕方が不明なため、実測の最大氾濫浸水深の算術平均値は不採用)、吉田川では2.48 m(10調査地点の最大氾濫浸水深の算術平均値)と評価される。

### (3) 湛水深や湛水面積の経時変化

図-7に小田川、千曲川、吉田川の各破堤氾濫域における無次元の空間平均湛水深 $h_d/h_{am}$ (小田川)や湛水面積 $A/A_m$ (千曲川、吉田川)の推定経時変化を示す。小田川でのものは既報<sup>9)</sup>の結果、千曲川と吉田川でのものは国交省の調査結果<sup>9) 15)</sup>に基づいている。図中には破線で後述する氾濫水密度 $\rho$ の評価の際に用いる近似の経時変化も示されている。図から、1) 上述の3破堤氾濫域における最大の空間平均湛水深 $h_{am}$ や湛水面積 $A_m$ となる時間 $t$ は、各最大湛水面積が同程度であるためか、洪水が堤防を越水開始( $t=0$ )してから7~13時間後で、ほぼ同じであること、2) 無次元の空間平均湛水深 $h_d/h_{am}$ や湛水面積 $A/A_m$ の増加曲線は破堤氾濫域毎の状況にあまり依存せず、低減曲線は破堤氾濫域毎で異なることが判る。

## 5. 氾濫水の断面平均の土砂濃度と密度

### (1) 湛水量と堆積土砂量

#### a) 千曲川

破堤氾濫域における最大湛水量 $V$ は4.(2)節の結果を踏まえて湛水部の立体形状を三角錐、最大湛水面積 $A_m$ を $9.5 \text{ km}^2$ <sup>9)</sup>、最大氾濫浸水深 $h$ を現地調査結果の4.94 m(表-1参照)とすれば、 $9.5 \text{ km}^2 \times 4.94 \text{ m} = 2.35 \times 10^7 \text{ m}^3$ と概算される。

破堤氾濫域における堆積土砂量 $V_s$ は、土砂堆積厚として表-1に示す堤外地の4調査地点を除いた15調査地点の算術平均土砂堆積厚0.0337 mを採用すれば、 $9.5 \text{ km}^2 \times 0.0337 \text{ m} = 3.20 \times 10^5 \text{ m}^3$ (土砂間隙を含む)と概算される。

#### b) 吉田川

破堤氾濫域(氾濫域とII)における最大湛水量は湛水部の立体形状を一様幅の緩傾斜した矩形、最大湛水面積 $A_m$ を $7.0 \text{ km}^2$ (Google Earthのポリゴン機能を用いて評価)、最大空間平均湛水深 $h_{am}$ を現地調査結果の2.48 m(表-2参照)とすれば、 $7.0 \text{ km}^2 \times 2.48 \text{ m} = 1.73 \times 10^7 \text{ m}^3$ と概算される。

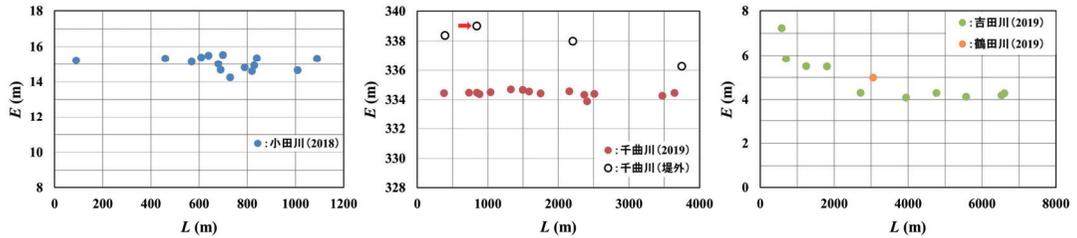


図-6 破堤地点からの直線距離 $L$ と最大氾濫水位 $E$ の関係 (左:小田川, 中央:千曲川, 右:吉田川)

破堤氾濫域における堆積土砂量は, 土砂堆積厚として表-2に示すSt.11を除いた10調査地点の算術平均土砂堆積厚0.0166 mを採用すれば,  $7.0 \text{ km}^2 \times 0.0166 \text{ m} = 1.162 \times 10^5 \text{ m}^3$  (土砂間隙を含む)と概算される。

## (2) 断面平均の土砂濃度と密度の概算

提示概算法<sup>3)</sup>により千曲川と吉田川の破堤氾濫域における氾濫水の断面平均の土砂濃度 $C_m$ と密度 $\rho$ を概算する。

提示概算法における増水・満水・減水時の土砂堆積モデルの仮定を再掲・加筆すれば, 次の通りである<sup>3)</sup>。

- 1) 湛水域は, 土砂堆積を平面空間平均で論じるので, 水平床の矩形とする。
- 2) 湛水域の増水時間 (千曲川: 9 h, 吉田川: 13 h) は全湛水時間 (千曲川: 84 h, 吉田川: 275 h) に比べて短く (図-7参照), 増水時の破堤氾濫流は有意な氾濫流速を持つので, 増水時の土砂堆積は無視できるとする。
- 3) 最大の空間平均湛水深 $h_m$ と湛水面積 $A_m$ は4.(2)節, 最大湛水量は5.(1)節で評価した値, 無次元空間平均湛水深 $h_d/h_m$ の経時変化は $h_d/h_m = A/A_m$ として図-7中の破線とする。
- 4) 減水時は破堤地点から氾濫水の流入出がないとする。
- 5) 湛水内の土砂粒径 (=中央粒径 $d_{50}$ ) は一様で, 土砂濃度 $C_m$ と密度 $\rho$ は時・空間的に一定 (=断面平均値) とする。ただし, 減水時の水位低下に比べて土砂の沈降が速く清水となる部分が存在すれば, その部分は除く。

### a) 計算式

土砂粒径データが存在する千曲川での場合を示す。満水状態の継続時間を0, 土砂の沈降速度を $v_f$ とする。したがって, 減水時のみが計算対象となり, 千曲川の破堤氾濫域における堆積土砂量 (実体積)  $V_s$ は後述する無次元水位低減時間 $t_{b1}$ の値次第で次の3ケースが考えられる。ただし, 単位は (m, s), 最大の空間平均湛水深 $h_m = 2.47 \text{ m}$ , 図-7における減水時の折れ破線の始点から終点までの3座標 ( $t, h_d/h_m$ ) は順に(9 h, 1), (59 h, 0.16= $h_{d2}$ ), (84 h, 0)である。

- ・ケース1 ( $t_{b1} = 3600 \times (59-9) v_f / h_m \geq 1$ ):

$$V_s = V_c C_m \quad (1)$$

- ・ケース2 ( $1 - h_{d2} \leq t_{b1} < 1$ ):

$$V_s = V_c C_m \quad (t_{b2} = 3600 \times (84-59) v_f / h_m (1-t_{b1}) \geq 1)$$

$$V_s = V_c C_m t_{b1} + V_c C_m (1-t_{b1}) t_{b2} \quad (t_{b2} < 1) \quad (3)$$

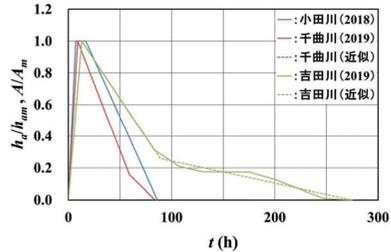


図-7 無次元の空間平均湛水深 $h_d/h_m$ と湛水面積 $A/A_m$ の経時変化

- ・ケース3 ( $t_{b1} < 1 - h_{d2}$ ):

$$V_s = V_c C_m t_{b1} + h_{d2} V_c C_m \quad (t_{b3} = 3600 \times (84-59) v_f / h_m / h_{d2} \geq 1) \quad (4)$$

$$V_s = V_c C_m t_{b1} + h_{d2} V_c C_m t_{b3} \quad (t_{b3} < 1) \quad (5)$$

ここで,  $t_{b1}$ は減水初期 $t=9 \text{ h}$ の水面位の土砂が底面まで沈降に要する時間を基準とした $t=9 \sim 59 \text{ h}$ まで,  $t_{b2}$ は $t=59 \text{ h}$ の上端位の土砂 (この上端位から水面位までは清水) が底面まで沈降に要する時間を基準とした $t=59 \sim 84 \text{ h}$ まで,  $t_{b3}$ は $t=59 \text{ h}$ の水面位の土砂が底面まで沈降に要する時間を基準とした $t=59 \sim 84 \text{ h}$ までの水面位低減時間である。

### b) 計算例

自然堆積土砂(シルト・粘土)の間隙比 $e$ として一般的な2~3を採用すれば<sup>16)</sup>, 実体積の堆積土砂量 (千曲川)  $V_s$ は5.(1)節における概算値 $V_{s0}$ の1/3~1/4倍の $(8.00 \sim 10.66) \times 10^4 \text{ m}^3$ となる。したがって, 土砂粒径 $d_{50}$ を12取得データの算術平均値である0.0156 mmとし (表-1参照), ストークスの式で沈降速度 $v_f$ の評価が可能で, 水温を20°Cとすれば,  $v_f = 2.19 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $t_{b1} = 16.0 > 1$ となり, 断面平均土砂濃度 $C_m$ は

$$\text{式(1)} = V_c C_m = (8.00 \sim 10.66) \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$\therefore C_m = (3.41 \sim 4.54) \times 10^{-3} \approx (0.34 \sim 0.45)\%$$

満水状態の継続時間を0, 減水時は破堤地点から氾濫水の流入出がないとしているので, 無次元水位低減時間 $t_{b1}$ が1以上であれば, 堆積土砂量は土砂粒径に依存しない。千曲川の場合,  $t_{b1} = 1$ は $v_f = 1.37 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ,  $d_{50} = 0.0039 \text{ mm}$  ( $\leq 0.0039 \text{ mm}$ )の粘土と判定される。したがって, 満水状態の継続時間が短く, 堆積土砂成分が粘土だけでない場合, 堆積土砂量はほぼ最大湛水量で決まり, 千曲川での場合の断面平均土砂濃度 $C_m$ は詳細な土砂粒径の情報がなくても(0.34~0.45)%と評価される。この知見を利

用すれば、吉田川での場合のものは(0.17~0.22)%と評価される。

氾濫水の密度 $\rho$ や比重 $\rho/\rho_w$ は、 $\rho_s$ を土砂の密度、 $\rho_w$ を清水の密度とすれば、次式から評価される。

$$\rho = \rho_w \{1 + (\rho_s / \rho_w - 1) C_m\} \quad (6)$$

したがって、 $\rho/\rho_w=2.65$ 、 $e=2\sim 3$ とすれば、千曲川での場合における算術平均の土砂粒径 $d_{50}=0.0156$  mmに対する氾濫水の比重 $\rho/\rho_w$ は1.0056~1.0075と評価される。この値は小田川での場合における評価値1.0036~1.011<sup>3)</sup>とほぼ同じである(小田川では土砂粒径を測定していないが、千曲川での場合の粒径と湛水経時パターンが同じとすれば、 $\rho/\rho_w=1.0042\sim 1.0056$ と評価される)。この値や図-3左に示した結果から、氾濫水密度 $\rho$ は次式の土砂堆積厚 $Z$ と最大氾濫浸水深 $h$ の比で概算できることが再確認されたと言える。

$$\rho \approx \rho_w (1 + Z/h) \quad (7)$$

最後に上記評価値の妥当性の一検証を試みる。最大湛水時の水中土砂が全て沈降堆積する(式(1)または(2)の場合)とすれば、土砂濃度 $C_m$ の評価値(0.34~0.45)%は実体積の土砂堆積厚 $Z_s$ に関して $Z_s/h=(0.34\sim 0.45)\%$ に相当する。評価において堆積土砂の間隙比 $e$ を2~3としたので、実際状態の土砂堆積厚 $Z$ に関して $Z/h$ は $Z_s/h$ を(3~4)倍した(1.02~1.82)%となる。現地調査で得た $Z/h$ は1.40% (15個の算術平均値)で、評価値はその73~129%、平均で101%である。諸量・諸事象を単純化して評価する本提示概算法は湛水部立体形状の単純化が妥当であればこの程度の精度を持つ。

## 6. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- (1)既報<sup>3)</sup>の土砂堆積モデルに基づき、2019年10月の台風第19号豪雨による千曲川と吉田川の破堤氾濫域の現地調査で得られた最大氾濫浸水深 $h$ と土砂堆積厚 $Z$ 、堆積土砂成分および利用可能な破堤氾濫域の湛水情報を用いて、洪水の破堤による氾濫水の断面平均密度 $\rho$ の概算(1.0056~1.0075 g/cm<sup>3</sup>)を行った。概算された氾濫水密度 $\rho$ は既報の小田川での1.0036~1.011 g/cm<sup>3</sup>とほぼ同じで、概算法の有用性が確認された。
- (2)破堤氾濫湛水の満水状態の継続時間が短く、堆積土砂成分が粘土だけでない場合、既報<sup>3)</sup>の概算法による氾濫水密度 $\rho$ は最大湛水量でほぼ決まる。
- (3)洪水の大規模な破堤氾濫域における最大氾濫浸水位 $E$ の空間分布は、吉田川での場合のように破堤氾濫域が細長い場合を除けば、ほぼ一様である。

(4)最大湛水面積が同程度の場合、無次元の空間平均湛水深 $h_s/h_{cm}$ や湛水面積 $A/A_m$ の増加曲線は破堤氾濫域毎の状況にあまり依存せず、低減曲線は大きく依存する。

- (5)堆積土砂が主に泥の場合、土砂堆積厚 $Z$ は最大氾濫浸水深 $h$ の1%程度以下で、氾濫水密度 $\rho$ は土砂堆積厚・最大氾濫浸水深比 $Z/h$ で概算できることを再確認した。

謝辞：本研究の遂行に科研費(基盤研究(C)、17K01320、代表：松富英夫)の補助を受けた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 松富英夫, 三上 輝, 千葉裕太: 氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, pp.397-402, 2019.
- 2) 鎌滝孝信, 宇内凜志, 得丸達生, 松富英夫: 秋田県南部および山形県北部沿岸低地における津波浸水履歴の検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, pp.403-408, 2019.
- 3) 松富英夫, 鎌滝孝信: 2018年7月西日本豪雨による真備町氾濫域における土砂堆積の実態と氾濫水密度の概算, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.75, No.5, pp.1477-1482, 2019.
- 4) 国交省東北地方整備局河川部: 令和元年10月12日出水(台風第19号)の概要, 2019.
- 5) 国交省北陸地方整備局河川部: 令和元年10月台風第19号における出水の概要(第3報), 2019/11/30参照.
- 6) 国土地理院: 浸水推定断彩図, <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihu19gou.htm#11>, 2019/10/19参照.
- 7) 国交省河川局: 信濃川水系河川整備基本方針, p.23, 2008.
- 8) 国交省北陸地方整備局: 第2回千曲川堤防調査委員会資料, 令和元年11月13日, 2019/11/30参照.
- 9) Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffé, B., Nishimura, Y., Richmond, B., Sugawara, D., Szczuciński, W., Tappin, D.R., Witter, R. and Yulianto, E.: New insights of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event, *Marine Geology*, **290**, pp.46-50, 2011.
- 10) 国交省河川局: 鳴瀬川水系河川整備基本方針, p.13, 2006.
- 11) 国交省東北地方整備局: 第2回鳴瀬川堤防調査委員会資料, 令和元年11月7日, 2019/11/13参照.
- 12) 仙台管区気象台: 宮城県災害時気象資料 - 令和元年台風第19号による大雨と暴風・高波 -, p.34, 2019.
- 13) 松富英夫, 今野史子: 2017年7月秋田豪雨による雄物川洪水氾濫の特徴と課題, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.1165-1170, 2018.
- 14) 国土地理院: 基盤地図情報, <https://fgd.gsi.go.jp/download/map/Gis.php>, 2020/1/8参照.
- 15) 国交省北陸地方整備局: 台風第19号(令和元年10月17日)の対応について(第18報), 2019/10/31参照および私信.
- 16) 土質試験法改訂編集委員会: 土質試験法, 土質工学会, p.675, 1969.