

## 2018年7月西日本豪雨における真備町氾濫域の 土砂堆積と氾濫水密度の概算\*

秋田大学 松富英夫  
秋田大学 鎌滝孝信

### 1.はじめに

2018年7月6日～7日にかけた前線性西日本豪雨（正式名称：平成30年7月豪雨、期間：6月28日～7月8日。以下、本豪雨）により、一級河川高梁川の右一次支川小田川沿いの倉敷市真備町地区において越水や破堤により大規模な洪水氾濫が発生した。内水、小田川の越水や破堤氾濫ばかりでなく、左二次支川末政川、高馬川、内山谷川、右二次支川真谷川の越水や破堤氾濫も発生したため（破堤は計8箇所）、総氾濫面積は12 km<sup>2</sup>（地区面積の27%）程度<sup>1)</sup>、最大氾濫浸水深は5.4 m<sup>2)</sup>に達した。真備町地区的死者は51人に達し<sup>3)</sup>、高齢者の犠牲（鉛直避難の失敗）が目立った。全壊家屋数は4,520棟（倉敷市全体）で、これは本豪雨における市町村単位の全壊家屋数としては最大である<sup>4)</sup>。

洪水や津波氾濫後の土砂堆積の検討は洪水では氾濫流の流向や流速、規模評価、洪水と津波氾濫の違いなどを目的として<sup>5)</sup>、津波では歴史津波の規模評価を主目的として<sup>6)</sup>行われている。洪水と津波氾濫の違いでは、建築物に対する被害程度の違いも論じられている<sup>7)</sup>。

本研究は、土砂堆積と密接に関係する氾濫水密度に着目した津波荷重や津波規模評価の高度化研究を背景に<sup>8)</sup>、本豪雨における真備町氾濫域の現地調査に基づいて、洪水氾濫による土砂堆積の実態や氾濫水密度などを論じる。

### 2.現地調査

現地調査は2018年7月19日、20日の実質2日間である。主な調査項目は真備町地区氾濫域の各調査地点（St.と略記）における最大氾濫浸水深（＝最大氾濫浸水痕跡水位－土砂堆積地点地盤位）および堆積土砂の厚さと断面構造である。最大氾濫浸水深の測定にはレーザー距離計（Laser Technology社製）を用いた。

図-1に調査地点（●）や破堤地点（×）、堤防法面崩壊地点（△）などを示す。図中の黒アラビア数字は調査地点番号、赤ローマ数字は破堤地点番号である。

**表-1 現地調査結果例**

調査地点	浸水痕跡場所	土砂採取場所	堆積土砂	浸水深h(m)	土砂堆積厚Z(cm)	直線距離L(m)	備考
St.1	排水機場建屋壁面	畔	泥	5.25	1~3	1010	
St.2	健康福祉館壁面	駐車場他	泥	3.97, 3.54	0.4, 0.2~0.4	690, 730	9時前停止
St.3	浄化センター建屋壁面	水路の蓋	泥	6.05	0.2	840	
St.4	2階建て住家壁面	畔	泥	5.52	1.5~4	830	
St.5	2階建て住家壁面	畔	泥	5.39	2.5	610	
St.6	3階建てCRC造住家壁面	畔	泥	4.51, 4.39	0.5~1, 0.2~0.3	790, 820	
St.7	整備工場建屋内側壁面	道路脇	泥	5.69	1.5~2	640	証言
St.8	大型平屋店舗壁面	水田内	砂+泥	6.22	2.5	1090	砂0.2~0.3cm
St.9	2階建て住家壁面	畑地内	砂+泥	5.01	2~2.2	680	同厚
St.10	建造中2階建て住家壁面	水田内	砂+泥	5.23, 4.78	3, 2.8	570	2層(1+2.1)
St.11	2階建て住家壁面	畔	砂+泥	5.72	2	460	砂層0.1cm
St.12	2階建て住家壁面	畔	泥	5.73	1~1.5(乾燥)	700	1.5~2(湿潤)
St.13	蔵壁面	休耕地内	砂	5.42	5~6	90	

\* Sediment deposit and rough estimation of the density of inundation water in Mabi-cho flooded area caused by the West Japan torrential rainfall in July, 2018 by Hideo MATSUTOMI

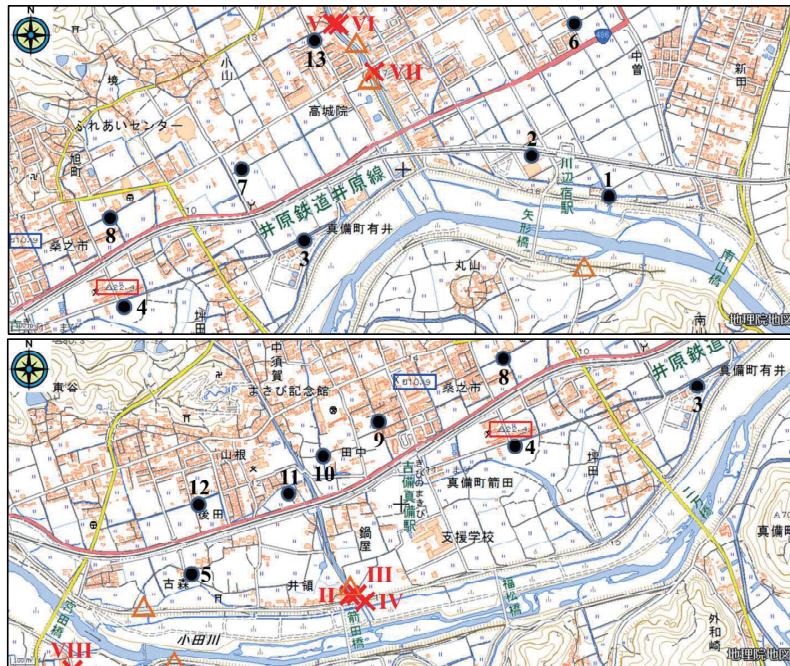


図-1 倉敷市真備町地区における浸水深や土砂堆積厚などの調査地点(国土地理院地形図に加筆)。●: 調査地点, ×: 破堤地点, △: 堤防法面崩壊地点, □: 三角点, □: 水準点, 黒アラビア数字は調査地点番号, 赤ローマ数字は破堤地点番号)



図-2 St.9における堆積土砂の断面構造 (砂層+泥層)

### 3. 土砂堆積状況の実態例

本研究では堆積土砂の成分を砂 (sand) と泥 (シルト・粘土, mud) の2種類に大別して論じる<sup>9)</sup>。表-1に各調査地点における現地調査結果例を示す。図-2にSt.9における堆積土砂の断面構造 (砂層 + 泥層) を示す。堆積土砂の成分は泥が主体 (mud-dominated) であった。

図-3に各調査地点における最大氾濫浸水深 $h$  (m)と土砂堆積厚 $Z$  (cm)の関係を示す。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年東北地方太平洋沖地震津波において仙台平野で得られた平均的な値で、■はそのときの取得データ例 (sand-dominated領域) である<sup>9)</sup>。▲は2017年7月の秋田豪雨において一級河川雄物川の左一次支川大納川の氾濫調査<sup>10)</sup> (参考文献10)における図-6中の $h=1.05$  m地点。溢水氾濫河川近傍の住家背後)で得られたもの (mud-dominated領域) である。図から、本豪雨における真備町地区氾濫域の土砂堆積厚は東北地方太平洋沖地震津波における仙台平野の場合と比べて薄い傾向にあることが判る。

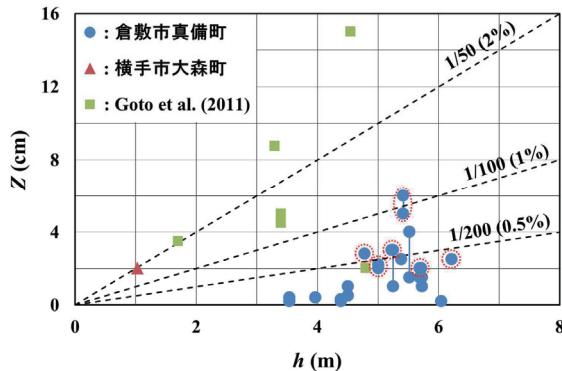


図-3 最大氾濫浸水深 $h$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係(赤破線囲いは砂や砂を含む土砂の堆積)

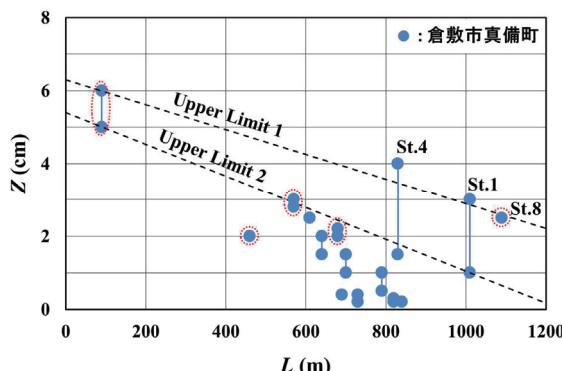


図-4 最寄りの破堤地点からの直線距離 $L$ と土砂堆積厚 $Z$ の関係(赤破線囲いは砂や砂を含む土砂の堆積)

ただし、堆積土砂が砂を有意に含む場合は（赤破線囲いのデータ。表-1参照），堆積厚が厚い傾向にある。津波氾濫の場合に比べて土砂堆積厚が薄い理由として、(1)洪水の氾濫水土砂濃度は津波のものに比べて薄い、(2)全般的に調査地点が破堤地点から大きく離れていて（後述の図-4参照）、洪水氾濫流の流勢が弱い<sup>7)</sup>、(3)本氾濫域は袋小路の湛水域で<sup>11)</sup>、全氾濫水量が制限された中で積極的に人工排水が行われたこと<sup>12)</sup>、すなわち最大氾濫浸水深の割に全土砂量が少ない（湛水時間≈土砂の沈降時間が短いとも言える）ことなどが考えられる。

参考までに、本研究現地調査における最大氾濫浸水深の中に土木学会発表の5.4 m<sup>2)</sup>より大きいものが存在する。これは著者らが主に一段低い田畠内の土砂堆積を対象としているためと考えられる（表-1参照）。また、土砂堆積厚はデータ収集時の堆積土砂の状態、すなわち乾燥状態(dry)か湿潤状態(wet)かに依存することに注意を要する。

図-4に各調査地点における最寄りの破堤地点からの直線距離 $L$  (m)と土砂堆積厚 $Z$  (cm)の関係を示す。直線距離はGoogle Earthの距離測定機能を用いて評価している。図中の赤破線囲いの意味は図-3の場合と同じである。また、暫定的に両者の関係に対する2種類の上限線が破線で示されている。図から、破堤地点から離れるにつれて、土砂堆積厚が薄くなることが判る。この傾向は東北地方太平洋沖地震津波において仙台平野で得られた土砂堆積傾向<sup>9)</sup>や一様勾配斜面を遡上する津波を模擬した土砂を含む氾濫流によるもの<sup>13)</sup>と同じである。St.1, 4, 8の3調査地点における土砂堆積厚が直線距離の割に厚めである。St.1に最寄りの破堤地点はVII地点、St.4はIV地点、St.8はV地点である。これら3調査地点の共通事項は次のような個別事情を有することである。St.1は近傍に排水路と小田川への排水樋管があり、土砂が集まり易いところと推定される。St.4は破堤延長が100 m程度に達した大規模な破堤部の下流域正面に位置している、換言すれば、洪水氾濫流が道路や鉄道施設(国

道486号と井原鉄道)などの大規模な人工構造物に妨げられていないところである。St.8は破堤地点IVとV(破堤延長300m程度)からほぼ直線距離に位置しているところである。

#### 4. 沔溢水の断面平均土砂濃度と密度の概算

##### 4.1 真備町地区の湛水量、貯留率と堆積土砂量

真備町地区氾濫域の湛水量、貯留率、堆積土砂量を利用可能なデータを用いて概算する。

小田川の幹川延長は72.9 km、流域面積は492 km<sup>2</sup>である。高梁川の幹川延長は111 km、流域面積は2,670 km<sup>2</sup>で、流域平均の2日間降水量は356 mm<sup>14)</sup>であった(3日間降水量350 mmという資料<sup>15)</sup>もある)。したがって、小田川流域における全降水量は $492 \text{ km}^2 \times 356 \text{ mm} = 1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ と概算される。

真備町地区における氾濫水の最大貯留量は、最大氾濫域の平面形を三角形<sup>16)</sup>、その三角形の頂点から底辺に垂直方向の断面形も三角形、すなわち三角錐と仮定し、最大氾濫面積を12 km<sup>2</sup>、最大氾濫浸水深を6 m(表-1参照)とすれば、 $12 \text{ km}^2 \times 6 \text{ m}/3 = 2.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ と概算される。

したがって、真備町地区氾濫域の貯留率(=最大貯留量/全降水量)は $2.4/17.5 = 0.137 \approx 14\%$ ということになる。この貯留率は2017年7月秋田豪雨における3~6%<sup>10)</sup>の2.3~4.6倍である。真備町地区はいかに貯留効果が大きく、洪水氾濫被害が甚大となり易いかが理解される。

真備町地区氾濫域の堆積土砂量は、土砂堆積厚として表-1に示した13調査地点の土砂堆積厚の平均値0.0202 mを採用すれば、 $12 \text{ km}^2 \times 0.0202 \text{ m} = 2.43 \times 10^5 \text{ m}^3$ (間隙を含む)と概算される。この堆積土砂量は10トンダンプトラックで約40,000台分である。

##### 4.2 真備町地区の氾濫や湛水の状況

- ・7月7日01:34に高馬川右岸の破堤(II地点)が確認された<sup>12)</sup>。この時刻は2.6 km下流に位置する小田川の矢形橋基準地点(高梁川との合流地点から0.8 km上流)における水位記録<sup>15)</sup>から推してほぼ最大水位時と考えられる。証言によれば<sup>17)</sup>、7月6日23:30~24:00の間に破堤したことである。この破堤時刻頃の車載のライブ映像写真(7月6日23:58)が存在する<sup>18)</sup>。
  - ・証言によれば<sup>17)</sup>、高馬川合流点直下流の小田川左岸の破堤(IV地点)は7月7日02:00~05:00の間のことである。図-5は7月7日07:00頃に撮られた破堤地点における氾濫状況写真で(破堤は06:52に確認)<sup>12)</sup>、この時刻頃には堤内外の水位差がほとんど認められない。すなわち、堤内地側がほぼ満水状態に達していたことを示している。破堤時の堤内地側の湛水深は不明であるが、破堤地点の堤内地側が流勢で大きく浸食されていることから<sup>15)</sup>、2~5時間の短時間で急激に増水、すなわち氾濫水は有意な氾濫流速を持った後に満水状態になったと推定される。
  - ・矢形橋基準地点では7月7日02:30に最大水位T.P. 15.49 mに達し、7月6日23:10~7月7日16:40までの17.5時間ほど計画高水位T.P. 14 mを超えた<sup>15)</sup>。7月7日の07:00には最大水位から1 m程度(T.P. 14.5 m)、24:00には3 m程度(T.P. 12.5 m)水位が下がった<sup>15)</sup>。
  - ・証言によれば<sup>17)</sup>、末政川右岸(V地点)は7月7日00:00過ぎ(高馬川右岸破堤の少し後)、左岸の2箇所(VI, VII地点)は7月7日06:30~07:00の間に破堤したことである。
  - ・調査地点St.2(浸水深は3.54~3.97 m)は、浸水して停止した高所にある時計から、7月7日09:00頃にほぼ最大浸水位に達したと推定される。
  - ・国土地理院の資料によれば<sup>16)</sup>、7月7日の日中と7月8日14:00の真備町地区氾濫浸水域はほぼ同じである。しかし、氾濫浸水域はあまり変化していないが、氾濫浸水位が大きく低下した写真が7月8日15:00に撮られている<sup>12)</sup>。その後、7月10日14:00までに氾濫浸水域はほぼなくなっている<sup>16)</sup>。
- 以上から、少なくとも7月7日07:00~7月7日17:00頃までの10時間は氾濫浸水域が満水状態であったと推定される。その後、7月10日14:00までの69時間をかけて氾濫水は排水(蒸発を含む)された



図-5 小田川と高馬川の合流地点直下流における破堤氾濫状況(国交省撮影。破堤延長は約100 m)

と推定される。図-6に真備町地区氾濫浸水域における湛水深の推定経時変化を示す。

#### 4.3 断面平均の土砂濃度と氾濫水密度の概算

真備町地区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 $\rho$ を概算するため、前節の諸状況を踏まえて簡易な満水・排水時の土砂堆積モデルを考案する。本モデルの考案に際し、次の仮定を導入する。

- (1)前節で仮定した三角錐域と異なるが、本節の検討では氾濫・湛水域を矩形で水平床とする。
- (2)氾濫・湛水域における増水時間は短く（図-6の破線部）、増水時の氾濫水は有意な氾濫流速を持っているので、土砂堆積は無視できるとする。
- (3)7月7日07:00～17:00までの10時間は満水状態で、浸水深は6/3=2 mとする。このときの貯留量は前々節で評価した最大貯留量とする。また、断面平均の氾濫水密度は時・空間的に一定とする。
- (4)7月7日17:00～7月10日14:00までの69時間で氾濫浸水深は2 m～0 mへ直線的に減少する。

##### 4.3.1 計算法

以上の仮定から、土砂の沈降速度を $v_f$ とすれば、満水時の土砂堆積量（実体積）は、

$$\cdot 2.4 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m \times 10 \times 3600 \text{ s} \times v_f / 2 \text{ m} = 4.32 \times 10^{11} \text{ m}^3 \times C_m \times v_f \text{ s/m} \quad (1)$$

排水時の土砂堆積量（実体積）は次の2ケースが考えられる。

$$\cdot 2.4 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m : 無次元時間 t_{*1} = 69 \times 3600 \text{ s} \times v_f / 2 \text{ m} \geq \quad (2)$$

$$\cdot 2.4 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m \times 69 \times 3600 \text{ s} \times v_f / 2 \text{ m} = 2.98 \times 10^{12} \text{ m}^3 \times C_m \times v_f \text{ s/m} : t_{*1} < \quad (3)$$

##### 4.3.2 計算例

したがって、土砂粒径毎の断面平均土砂濃度は（ $v_f$ はストークスの式で評価。温度は20°Cを仮定）、

$$\cdot d_{50}=0.02 \text{ mm } (v_f=3.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}, t_{*1}=44.7) \text{ のとき}$$

$$\text{式(1)+式(2)}=1.80 \times 10^8 \text{ m}^3 \times C_m=2.43 \times 10^5 \text{ m}^3 \therefore C_m=1.35 \times 10^{-3}=0.135\%$$

$$\cdot d_{50}=0.01 \text{ mm } (v_f=8.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}, t_{*1}=11.1) \text{ のとき}$$

$$\text{式(1)+式(2)}=6.24 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m=2.43 \times 10^5 \text{ m}^3 \therefore C_m=3.89 \times 10^{-3}=0.389\%$$

$$\cdot d_{50}=0.005 \text{ mm } (v_f=2.23 \times 10^{-5} \text{ m/s}, t_{*1}=2.77) \text{ のとき}$$

$$\text{式(1)+式(2)}=3.36 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m=2.43 \times 10^5 \text{ m}^3 \therefore C_m=7.22 \times 10^{-3}=0.722\%$$

$$\cdot d_{50}=0.002 \text{ mm } (v_f=3.56 \times 10^{-6} \text{ m/s}, t_{*1}=0.442) \text{ のとき}$$

$$\text{式(1)+式(3)}=1.21 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m=2.43 \times 10^5 \text{ m}^3 \therefore C_m=2.00 \times 10^{-2}=2.00\%$$

一般的に排水中に氾濫水の濁りがなくなることはないと考えられる。濁りがなくならない条件は $t_{*1}=1$ で、このときの沈降速度は $8.05 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  ( $d_{50}=0.003 \text{ mm}$ ) となり、断面平均土砂濃度は、

$$\text{式(1)+式(2)}=2.75 \times 10^7 \text{ m}^3 \times C_m=2.43 \times 10^5 \text{ m}^3 \therefore C_m=8.84 \times 10^{-3}=0.884\%$$

ほぼ乾燥した自然堆積土砂の間隙比 $e$ を2~3とすれば、断面平均土砂濃度は上記の1/3~1/4倍となる。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。

$$\rho=\rho_w \left\{ 1 + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) C_m \right\} \quad (4)$$

$\rho_s/\rho_w=2.65$ 、 $e=2\sim 3$ とすれば、各土砂粒径に対する氾濫水の比重は次のように評価される。

$$\cdot d_{50}=0.020 \text{ mm} \text{ のとき} : \rho/\rho_w=1.0005 \sim 1.0007, \cdot d_{50}=0.010 \text{ mm} \text{ のとき} : \rho/\rho_w=1.0016 \sim 1.0021$$

$$\cdot d_{50}=0.005 \text{ mm} \text{ のとき} : \rho/\rho_w=1.0030 \sim 1.0040, \cdot d_{50}=0.003 \text{ mm} \text{ のとき} : \rho/\rho_w=1.0036 \sim 1.0049$$

$$\cdot d_{50}=0.002 \text{ mm} \text{ のとき} : \rho/\rho_w=1.0083 \sim 1.0110$$

現実的には $\rho/\rho_w=1.0036 \sim 1.0110$ と考えられ、海水の比重（≈1.03程度）よりもかなり小さい。したがって、河口から流出した土砂水は海水表面部を広がることになる。

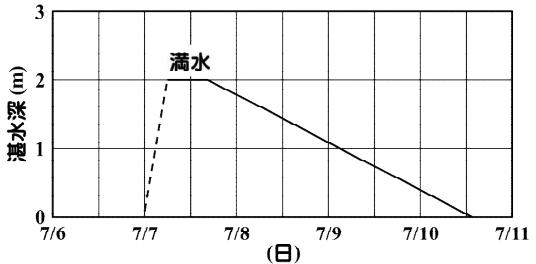


図-6 真備町地区氾濫域での湛水深の推定経時変化

## 5. おわりに

2018年7月の西日本豪雨における大規模な洪水氾濫域である倉敷市真備町地区の現地調査に基づいて、洪水氾濫による土砂堆積の実態、氾濫水の断面平均の土砂濃度 $C_m$ と密度 $\rho$ を検討した。主な結果は次の通りである。

- (1)調査地点St.13を除き、破堤地点から大きく離れた調査地点が多く、堆積土砂は泥が主体で、堆積厚 $Z$ は最大氾濫浸水深 $h$ の1%以下であった。この堆積厚は津波氾濫におけるものより薄い。
- (2)時間差を持つ2方向からの氾濫流があったためか、砂+泥の層が2層形成された調査地点(St.10)が存在した。下層は1.0 cmと薄く、上層は2.1 cmであった。本調査地点は堆積作用のみであったと考えられる。
- (3)初め氾濫流は北から来襲し、その後南から来襲したにもかかわらず、泥層1層のみが形成された調査地点(St.7)も存在した。
- (4)津波の場合<sup>9)</sup>と同様、砂や砂を含む土砂の堆積層が形成される場合は堆積厚が厚い傾向にあった。
- (5)土砂堆積厚は破堤地点からの直線距離 $L$ に依存し、直線距離が増加するにつれて薄くなるが、個別の条件次第では直線距離に関係なく厚くなるところも存在した。
- (6)大胆な仮定や土砂堆積モデルを導入して、今回の現地調査で得られた土砂堆積データから氾濫水の断面平均土砂濃度(0.22~0.67%)と密度(1.004~1.011 g/cm<sup>3</sup>)の評価を試みた。氾濫水密度は海水密度より小さいという妥当な結果が得られた。

**謝辞:**本研究の遂行にあたり科学研究費(基盤研究(C), 17K01320)の補助を受けた。謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 毎日新聞:真備の死者9割が自宅で 高齢で2階上がれず(2018年7月22日版), 2018/8/20参照.
- 2) 産経新聞:真備の浸水は5.4メートル「1階から2階への避難も困難」(2018年8月4日版), 2018/8/4参照.
- 3) 岡山県:平成30年7月豪雨による被害等について(8月17日14時現在), 2018/8/20参照.
- 4) 消防庁:平成30年7月豪雨及び台風第12号による被害状況及び消防機関等の対応状況について(第52報), 2018/8/20参照.
- 5) 例えば、産総研:鬼怒川大水害による洪水堆積物の特徴を緊急調査により解明—地層から過去の洪水履歴を読み解くための鍵—, 2018/8/27参照.
- 6) 西村裕一:津波堆積物の時空間分布に基づく古地震の調査研究, 地震, 第2輯, 第61巻特別号, pp.S497-S508, 2009.
- 7) 松富英夫:破堤氾濫と家屋被害, 平成16年7月北陸豪雨災害調査報告書, 土木学会・平成16年7月北陸豪雨災害緊急調査団, pp.67-72, 2005.
- 8) 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子:RC造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.265-270, 2018.
- 9) Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, 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) 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.
- 11) 岡山大学教育学部社会科教室内地域研究会:真備町—その地理と社会科教育—, 地域研究第25集, p.188, 1983.
- 12) 国土交通省中国地方整備局河川部:平成30年7月豪雨による中国地方整備局管内の出水概況 平成30年8月10日(金), 2018.
- 13) 松富英夫, 今野史子, 後村晃基, 今藤晃太, 鎌滝孝信, 渡邊一也:津波氾濫水密度とその遡上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017.
- 14) 国土交通省東北地方整備局:平成30年7月豪雨(西日本豪雨)災害の概要, 2018.
- 15) 国土交通省岡山河川事務所:第2回高梁川水系小田川堤防調査委員会資料, 2018.
- 16) 国土地理院:浸水推定断彩図, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html>, 2018/7/16参照.
- 17) 山陽新聞:「水が来るぞ!」叫びながら自宅へ 真備での日何が、渦流の証言(2018年8月6日版), 2018/8/29参照.
- 18) 前野詩朗:2018年7月西日本豪雨による岡山県における河川災害の概要と課題, 平成30年度河川災害に関するシンポジウム資料, pp.17-32, 2018.