

地球温暖化の影響に配慮した過去、現在と未来の確率降水量に関する研究

福井工業高等専門学校 環境都市工学科  
教授 野々村 善民

### 1 研究の目的

地球温暖化の影響により、各地方気象台の年最大1時間降水量の増加傾向は定性的に把握できる。一方、気象台のデータを用いた大雨の将来予測は未解明である。また、気象庁による降水量の観測期間は100年間を超え、地方自治体などから、実務に適用できる大雨の再現期間などの算出方法の開発が必要となっている。

これまでに気象庁において記録された日最大1時間降水量を用いて、本研究は地域を代表する確率降水量を明らかにすることを目的とする。次に、本研究は江戸時代に建造された広島県福山市の堂々川流域における流出解析を行い、当時の降雨範囲と降雨イベントについて検討する。なお、堂々川では6つの砂留（砂防堰堤）が1700年代の短い期間に建造された。流出解析は解析領域内の水深と降水量の関係を予測することである。

### 2 研究計画

#### 2-1 確率降水量の算出方法

本研究は福山市とその周辺を含む地域を代表する確率降水量を算出する。そのために、確率降水量を算出するための日最大1時間降水量は図1に示すように瀬戸内海の北側沿岸における13点の観測点におけるデータである。以下、この13点の観測点を含む地域を瀬戸内福山とする。

図2は複数の日最大1時間降水量を用いて降水量の発生頻度を作成する方法を示す。図中に示すように、福山周辺における発生頻度は各観測点における同年月日の日最大1時間降水量  $X_i$  の最大値を抽出して作成する。



図1 観測点の配置図  
(瀬戸内海、広島県福山市周辺)

瀬戸内福山における 日最大1時間降水量 [mm/h]				各観測点における 日最大1時間降水量 [mm/h]				
年	月	日	最大値	岡山	福山	姫路	笠岡	倉敷
2017	1	7	0	0	0	0	0	0
2017	1	8	6	6	3	1	3	3
2017	1	9	0	0	0	0	0	0
2017	1	10	0	0	0	0	0	0
2017	1	11	0	0	0	0	0	0
2017	1	12	0	0	0	0	0	0
2017	1	13	0	0	0	0	0	0

図2 複数の観測点を用いた日最大1時間降水量の発生頻度の作成方法(イメージ図)

表1は各観測点の観測期間である。観測期間の合計は134年間である。なお、1889年から1919年までの観測点は広島地方気象台の1点である。本研究では確率降水量を算出するための解析期間は10年間とした。例えば、年数1991年の確率降水量の解析期間は1991年～2000年である。表2は本報で用いる記号表である。

表1 各観測点の観測期間(合計13点)

地点	観測期間	地点	観測期間
大竹	1976年1月1日～2022年12月31日	福山	1942年3月1日～2022年12月31日
広島	1889年1月1日～2022年12月31日	笠岡 (かさおか)	1976年1月1日～2022年12月31日
呉	1920年1月1日～2022年12月31日	倉敷	1976年1月1日～2022年12月31日
倉橋	1976年1月1日～2022年12月31日	玉野	1976年1月1日～2022年12月31日
呉市蒲刈 (くれしかまがり)	2009年2月25日～2022年12月31日	岡山	1933年1月1日～2022年12月31日
竹原	1976年1月1日～2022年12月31日	虫明 (むしあげ)	1976年1月1日～2022年12月31日
生口島 (いぐちじま)	1976年1月1日～2022年12月31日		

表2 記号表

記号	説明
$S_1$	1年間に1回発生する日最大1時間降水量, 単位 mm/h
$S_3$	3年間に1回発生する日最大1時間降水量, 単位 mm/h
$S_{49}$	49年間に1回発生する日最大1時間降水量, 単位 mm/h
$R^2$	決定係数, 単位 -
$X_i$	日最大1時間降水量, 単位 mm/h
$Y_i$	年最大1時間降水量, 単位 mm/h

図3は流出解析に用いる降雨量モデルである。これは福山地方気象台において観測された10分間降水量である。この大雨の発生年月日は2018年8月28日である。

図4は瀬戸内福山の確率降水量であり、解析期間は133年間である。後述する流出解析の日最大1時間降水量 $X_i$ は、図4を用いて再現期間を1年間(49mm/h), 33年間(78mm/h)と49年間(82mm/h)として求めた。

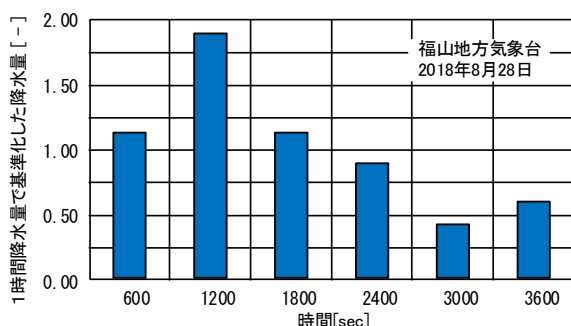


図3 流出解析に用いた降雨量モデル

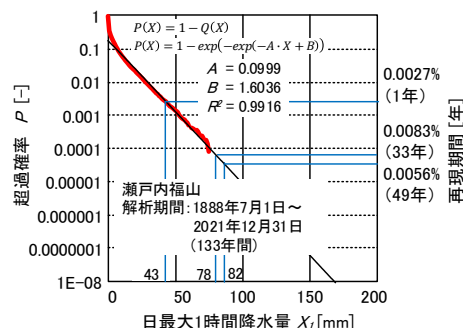


図4 瀬戸内福山の確率降水量 (解析期間: 133年間)

## 2-2 堂々川の歴史的事象

図5は江戸時代の福山藩によって建造された堂々川流域の3Dモデルである。図中に示すように、堂々川で建造された砂留は6箇所である。なお、砂留は閉鎖型砂防堰堤である。砂留は大雨による土石流を堰き止めるものである。従って、現時点では6つの砂留の上流側は土砂で埋まった状態となっている。

表3は福山藩によって作成された文献によって把握した砂留の建造年と建造間隔である。表中に示すように、砂留の建造間隔は3～49年間となっている。そこで、本研究は3年間で1回発生する日最大1時間降水量  $S_3$  と49年間で1回発生する日最大1時間降水量  $S_{49}$  を算出する。

表3 福山藩における砂留の建造年と  
建造間隔(再現期間)

建造年	砂留の名称	建造間隔	場所
1700	砂畑3箇所	-	広島県福山市堂々川
1732	鷺ヶ追砂留	32年	広島県福山市堂々川支流
1738	深水古砂留	6年	広島県福山市深水川
1787	本郷砂留	49年	広島県三原市本郷川
1812	峨谷下砂留	25年	広島県福山市福山SA付近
1832	堂々川3番砂留	20年	広島県福山市堂々川
1835	とうとう筋大砂留	3年	広島県福山市堂々川
1854	深水砂留	19年	広島県福山市神辺町西中条:深水川

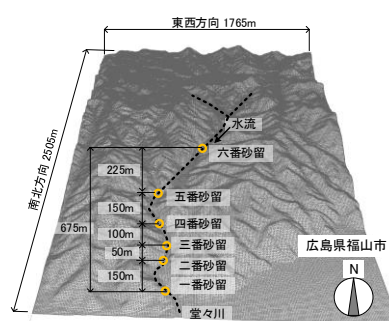


図5 堂々川流域の地形起伏の状況  
(3Dモデル)

### 2-3 流出解析について

表4は堂々川流域における流出解析の条件を示す。使用したソフトは iRIC (Nays2DFlood) である。この iRIC は2次元の解析である。空間メッシュのサイズは5m×5mである。

図6は iRIC に入力した 10 分間降水量である。この降水量は図3の降水量モデルを用いて算出した。3種類の1時間降水量は砂留の建造期間に対応させて、再現期間を1年間(49mm/h)、33年間(78mm/h)と49年間(82mm/h)とした。

表4 iRIC の解析条件(流出解析)

No.	事項	内容
1	使用したソフト	iRIC(Nays2DFlood)
2	解析の対象地域	広島県福山市神辺町の堂々川周辺
3	地形データ	USGS 標高タイル(SRTM)
4	移流項の差分方法	CIP 分法
5	マニングの粗度係数	0.035 [ $m^{-1/3} \cdot s$ ]
6	解析領域側方の境界条件	自然流出
7	初期水面	水深ゼロ
8	降雨条件	局地集中型豪雨時の降雨量モデル。図6を参照
9	メッシュ数	176853 個=353×501
10	解析領域	東西方向 1765m× 南北方向 2505m
11	メッシュサイズ	5m×5m

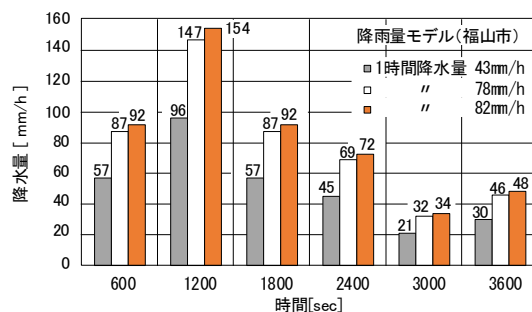


図6 iRICによる流出解析の入力データ (連続した10分間降水量)

### 3 解析結果

#### 3-1 瀬戸内福山の確率降水量について

地域を代表する確率降水量の新規性を明らかにするために、本研究は年最大1時間降水量  $Y_t$  と再現期間1年間の日最大1時間降水量  $S_t$  を比較検討する。

図7は瀬戸内福山の年最大1時間降水量  $Y_t$  の経年変化を示す。図中に示す  $Y_t$  を外挿した近似直線の決定係数  $R^2$  は 0.2692 となり、相関は低くなることがわかる。従って、 $Y_t$  は概ね増加傾向となることがわかる。

図8は瀬戸内福山の再現期間1年間の日最大1時間降水量  $S_t$  の経年変化を示す。なお、解析期間は10年間とした。また、図中の1951年のデータの解析期間は1951年～1960年である。図中に示す  $S_t$  の近似直線の決定係数  $R^2$  は 0.8666 となり、高い相関を示すことがわかる。この近似直線を用いることで、過去から未来の  $S_t$  が予測できることがわかる。例えば、1965年(昭和40年)の  $S_t$  は 43.2mm/h となる。次に、2022年の  $S_t$  は 54.6mm/h となる。つまり、2022年の  $S_t$  は1965年の場合と比べて、約1.3倍となることがわかる。

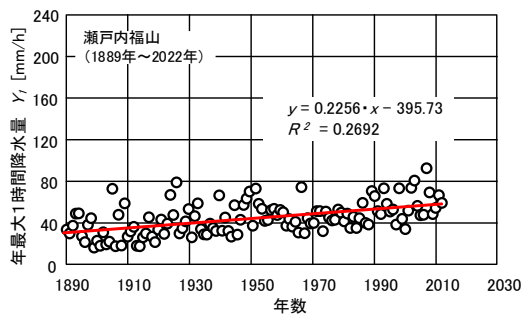


図7 年最大1時間降水量の経年変化  
(瀬戸内福山)

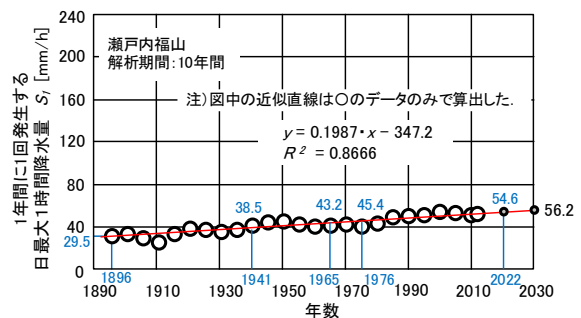


図8 再現期間1年間の日最大1時間降水量の経年変化(瀬戸内福山)

### 3-2 堂々川の流出解析について

図9は堂々川における流出解析による最大水深の分布図である。1時間降水量は82mm/hであり、解析時間は2400secである。図中から堂々川流域における全ての分水嶺が解析領域に含まれていることがわかる。

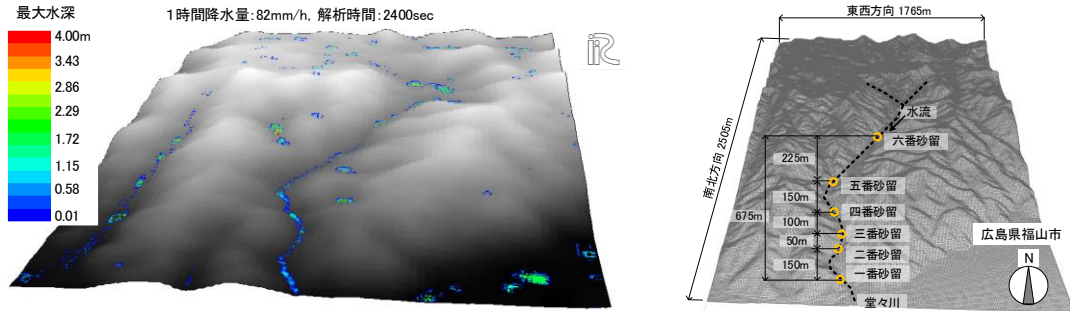


図9 堂々川における最大水深分布の3D表示  
1時間降水量:82mm/h, 解析時間 2400sec

図10は3つの解析ケースによる堂々川における流量 $Q$ の変化である。流量を算出した地点は図中に示す6つの砂留の位置である。1時間降水量が43mm/hである場合、 $Q$ は最も川上側に位置する六番砂留からの距離 $L$ に関係なく概ね一定値であり、4.5~5.2  $m^3/s$ となる。1時間降水量が78mm/h以上である場合、 $Q$ は $L$ に比例して増加することがわかる。

図11は3つの解析ケースによる堂々川における流速 $S$ の変化である。各解析ケースでは、 $S$ は $L$ に比例して加速することがわかる。

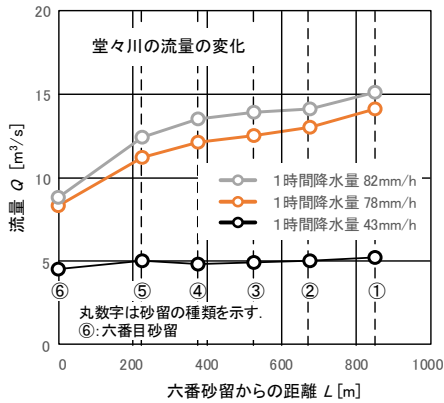


図10 1時間降水量の違いによる堂々川における流量の変化

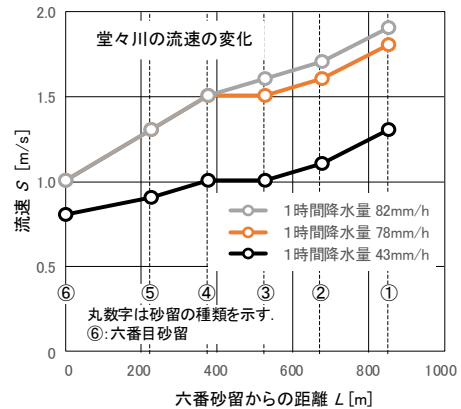


図11 1時間降水量の違いによる堂々川における流速の変化

図 12 は 1 時間降水量 43mm/h の流量  $Q$  と六番砂留からの距離  $L$  の関係と流速  $S$  と  $L$  の関係の近似式とそのフィッティング状況を示す。上述したように、1 時間降水量 43mm/h の時、 $L$  に関係なく、 $Q = 4.9 \text{ m}^3/\text{s}$  となることがわかる。図中に示すように、 $S$  と  $L$  の関係は直線近似となり、決定係数  $R^2$  は 0.9297 となることがわかる。

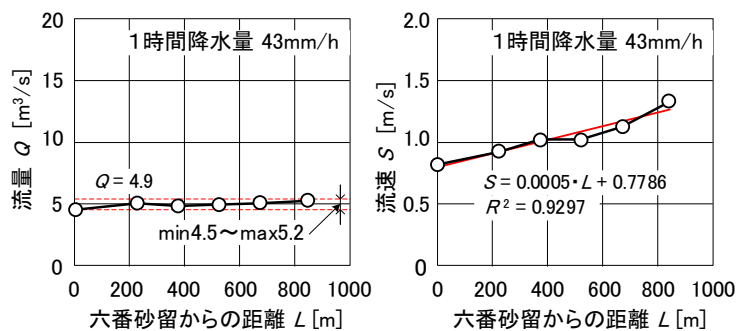


図 12 堂々川における流量と流速の変化  
(1 時間降水量 43mm/h)

図 13 は 1 時間降水量 78mm/h の流量  $Q$  と六番砂留からの距離  $L$  の関係と流速  $S$  と  $L$  の関係の近似式とそのフィッティング状況を示す。図中に示すように、 $S$  と  $L$  の関係は二次の曲線近似となり、 $S$  と  $L$  の関係は直線近似となることがわかる。共に高い相関を示し、 $R^2$  は 0.9681 と 0.9445 となる。

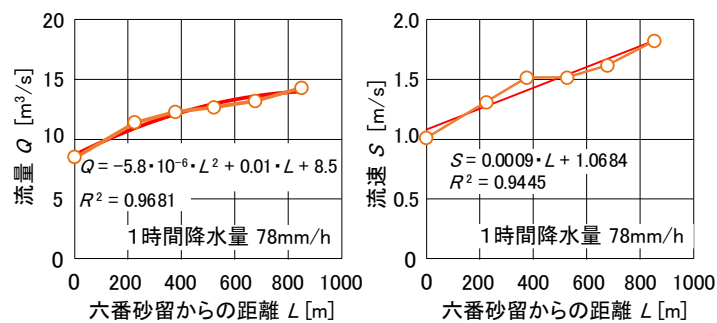


図 13 堂々川における流量と流速の変化  
(1 時間降水量 78mm/h)

図 14 は 1 時間降水量 82mm/h の流量  $Q$  と六番砂留からの距離  $L$  の関係と流速  $S$  と  $L$  の関係の近似式とそのフィッティング状況を示す。図中に示すように、 $S$  と  $L$  の関係は二次の曲線近似となり、 $S$  と  $L$  の関係は直線近似となることがわかる。共に高い相関を示し、 $R^2$  は 0.9619 と 0.9811 となる。

以上のように、3 ケースの流出解析によって、堂々川における流量  $Q$  と流速  $S$  は、最も川上側に位置する六番砂留からの距離  $L$  を用いて近似式で表すことがわかる。

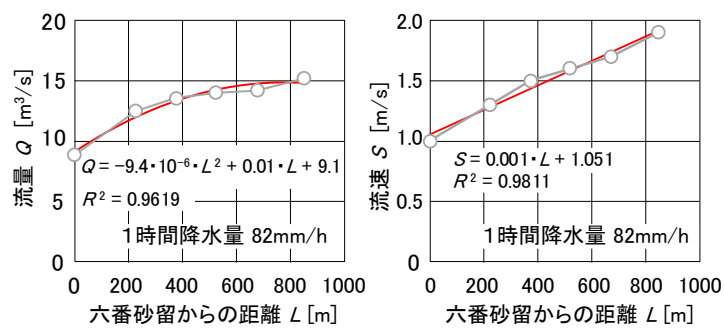


図 14 堂々川における流量と流速の変化  
(1時間降水量 82mm/h)



#### 4 まとめ

広島県福山市の堂々川にある複数の砂留は江戸時代の 1700 年代に建造され、それらは記録に残る国内外最古の砂防堰堤である。本研究では、これらの砂留の建造間隔が当時の大雨の再現期間に相当するものとした。

そのために、本研究は広島県福山市を中心とする瀬戸内海沿岸における確率降水量を明らかにした。確率降水量の算出するための解析期間を 133 年間とした場合、再現期間を 1 年間とした日最大 1 時間降水量  $X_1$  は 49mm/h となることがわかった。次に、再現期間を 49 年間とした  $X_1$  は 82mm/h となることがわかった。

瀬戸内福山の再現期間 1 年間の日最大 1 時間降水量  $S_1$  の経年変化から求めた直線近似の決定係数 ( $R^2 = 0.8666$ ) は年最大 1 時間降水量の場合 ( $R^2 = 0.2692$ ) と比べて、かなり高くなることがわかった。この時の確率降水量の算出するための解析期間は 10 年間である。この  $S_1$  の近似直線を外挿することで、過去から未来の  $S_1$  が予測できることがわかった。例えば 2022 年の  $S_1$  は 1965 年の場合と比べて、約 1.3 倍となることがわかった。

福山藩が建造した 6 つの砂留の建造間隔は 3 年～49 年であることがわかった。49 年の建造間隔を大雨の再現期間とした場合、これに相当する大雨の 1 時間降水量は 82mm/h となることがわかった。

江戸時代の福山藩における大雨時の堂々川の水の流れの状況を流出解析によって予測した結果、堂々川における流量と流速は、最も川上側に位置する六番砂留からの距離を用いて近似式で表すことができることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 友松靖夫：石積み堰堤を追いかけて（下），SABO vol.80，pp.37-pp.45，2004 年 10 月
- 2) 広島県土木建設局砂防課：福山藩砂留案内，2022 年 3 月 15 日閲覧
- 3) 野々村善民，島脇優里：神戸地方気象台における確率降水量に関する研究 淀川チャンネル型大雨の影響を受ける再現期間 100 年の降水量の算出方法，日本建築学会・情報システム技術委員会 第 43 回情報・システム・利用・技術シンポジウム 2020 論文集，pp.364-36，2020 年 12 月
- 4) 野々村善民，島脇優里，萩原春親：戦国時代の一乗谷川における外水氾濫に関する研究 考古学的資料に基づく 3D モデルの作成と河川氾濫解析，日本建築学会・情報システム技術委員会 第 44 回情報・システム・利用・技術シンポジウム 2021 論文集，pp.161-166，2021 年 12 月