

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

A Study on River floods in Ichijodani River for the Sengoku Period

3D model creation and the river flooding analysis using the archaeological materials

○野々村 善民^{*1}, 島脇 優里^{*2}, 萩原 春親^{*3}

Yoshitami Nonomura^{*1}, Yuuri Shimawaki^{*2} and Haruchika Hagiwara^{*3}

*1 福井工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 博士(工学)

Professor, National Institute of Technology, Fukui College, Dr.Eng.

*2 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency.

*3 株式会社サンワコン 空間情報部

Spatial Information Department, SANWACON Co., Ltd

Summary: The purpose of this study is to clarify the return period of river flooding of Ichijodani River for Sengoku periods. Since Ichijodani area of Fukui City is surrounded by the mountains, the topography and heavy rain caused river floods many times there. In 2019, Fukui Prefectural Ichijodani Asakura Family Site Museum discovered the ruins indicating the cross section of Ichijodani River in Sengoku period. In addition, evidence of river flooding occurred in the past was discovered in the Ichijodani area.

In these ruins document discovered by the museum, the precipitation of the heavy rain at that time was unidentified. Therefore, this study reproduced the past Ichijodani area as a 3D model using the past Ichijodani River cross section of the ruins document. Following that, this study analyzed the water flow in the past Ichijodani area using this 3D model and Computational Fluid Dynamic.

In the case when flooded waters from the past Ichijodani River reached a height of 1m from the ground level of the Western past houses, the hourly precipitation of the heavy rain at that time was found to be 42mm. As the return period of the heavy rain was calculated using probability precipitation of Fukui, the return period of 42mm precipitation is 3.5 days in one year.

キーワード: 戦国時代; 一乗谷川; 氾濫解析; iRIC; MARS 法; 確率降水量

Keywords: Sengoku periods; Ichijodani River; Flooding analysis; International River Interface Cooperative; Multi-interface Advection and Reconstruction Solver; Probability precipitation.

1. はじめに

戦国大名朝倉氏の城下町一乗谷は山に囲まれ、水害が生じやすい福井市の一乗谷川沿いの谷間にある。一乗谷は谷間の城下町であるため、水害に見舞われやすく、近年でも平成 16 年の福井豪雨で大きな被害を受けている。過去の水害の状況を知る手がかりとして、一連の遺跡調査の中で、福井県立一乗谷朝倉氏遺跡資料館（以下、資料館）は 2019 年に戦国時代の一乗谷川（以下、旧一乗谷川）の河川断面を示す遺構を発見した。

また、資料館が保有する遺跡調査資料から、旧一乗谷川における外水氾濫は 1573 年の朝倉氏滅亡直後に 1 度あったことがわかった。これを裏付ける資料として、旧一乗谷川の河川断面の主要寸法が明らかになった。これまでの遺跡調査資料のみでは、旧一乗谷川で生じた氾濫時の降水量などの気象条件は不明であった。

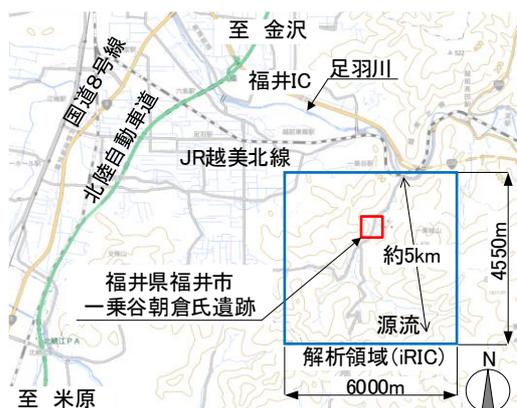
なお、これまでに戦国時代の河川氾濫を予測した研究

例としては、根元らは流出解析と氾濫解析を組み合わせ、1582 年、岡山県の備中高松城水攻めで造られた堤防の規模について検討した^{文献 1)}。

また、根元らは流体数値シミュレーションを用いて、山梨県の御勅使川における信玄堤の治水能力を明らかにしている^{文献 2)}。以上の 2 つの研究例では、過去の河川氾濫による水の流れを現在の気象データと流体数値シミュレーションを用いた予測手法は学術的に有効であることがわかった。

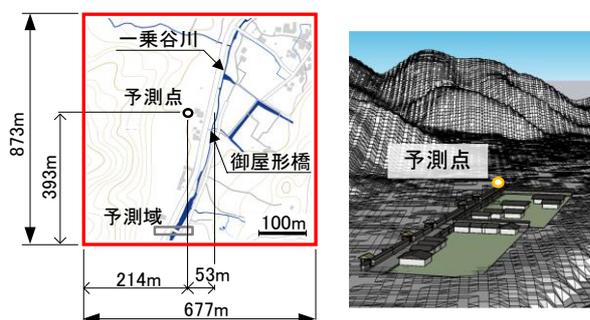
そこで、本稿は資料館の遺跡調査資料を用いて再現した旧一乗谷川流域の 3D 地形モデルと流体数値シミュレーションを用いて、1 時間降水量と旧一乗谷川流域における水深の関係を予測する。

本稿で用いた河川氾濫シミュレーション iRIC (Nays2DFlood) は国内外の実務で利用され、河川流域における水深および流速が予測できる^{文献 3)}。



(1) 現在の一乗谷川

(1) 広域モデルの解析領域 (iRIC)



(2) 狭域モデルの解析領域 (STREAM) と町並立体復原地区の様子



(2) 朝倉館跡と復原町並

図1 解析領域の配置図

写真1 現在の一乗谷朝倉氏遺跡の様子 (福井県福井市)

iRICは2次元解析であり、空間メッシュのサイズは河川の流域面積に比例する。そのため、空間メッシュのサイズは概ね10m以上となる。従って、川幅が10m未満となる小規模の河川を対象とした場合、大雨時の越水の水深分布などは予測困難となる

そこで、iRICの解析結果を河川の流量条件として、本稿は3次元解析である流体数値シミュレーションSTREAMを用いて越水の水深分布などを予測する。

具体的には、iRICを用いた解析は1時間降水量と旧一乗谷川の流量の関係を明らかにする。以下、これを広域モデル解析と言う。STREAMを用いた解析は、一乗谷川の西岸にある遺跡内における大雨時の水深を予測する。以下、これを狭域モデル解析と言う。

次に、福井県内における日最大1時間降水量の年間発生日数は、達川らが提案した福井県の確率降水量を用いて算定した。以下、1時間降水量の年間発生日数を再現期間とする。

上記の確率降水量はFaデータに基づくものであり、福井県内とその周辺の20か所において計測された降水量データの最大値を用いて作成されたものである^{註1)}。

以上から、本研究は旧一乗谷川流域の3D地形モデル、2種類の河川氾濫シミュレーションと現在の気象データ

を用いて、1573年の朝倉氏滅亡直後に発生した氾濫時の1時間降水量を予測し、その再現期間を算出することを目的とする。

2. 研究計画

2.1. 旧一乗谷川の河川形状について

図1(1)は広域モデルの解析領域である。この解析領域の範囲は東西方向6000mおよび南北方向4550mである。解析領域のほぼ中心に一乗谷川がある。一乗谷川は福井県福井市の山間部にある。一乗谷周辺で降った水は南側の源流から北側の足羽川に向かって流れる。

図1(2)は狭域モデルの解析領域である。この解析領域の範囲は東西方向677mおよび南北方向873mである。図中の予測点の位置は一乗谷川から西側に53m離れている。

写真1は現在の一乗谷朝倉氏遺跡の外観である。一乗谷川は谷間を流れている。なお、朝倉館跡の標高は周囲に比べて高くなっている。

写真2は現在の一乗谷川の西岸において再現された復原町並における土塀である。土塀の下部は石垣であり、その高さは地面から約1mである。この土塀は図1(2)に示す予測点と同じ位置である。



写真2 復原町並の土塀

表1 iRICによる広域モデル解析の主な条件

No	事項	内容
1	使用したソフト	iRIC(Nays2DFlood)
2	解析の対象地域	福井県福井市の一乗谷川流域
3	地形データ	国土地理院 基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュ 533672,533673,543602,543603
4	流移項の差分方法	CIP 法
5	マンニングの粗度係数	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	2008年7月8日 福井地方気象台の観測値
9	解析領域	6000m × 4550m
10	空間メッシュ数	273000 [個] = 600 × 455
11	格子サイズ	10m × 10m

ここでは、本研究は復原町並の土塀の石垣は大雨時の越水の備えであるものと想定する。

図2は資料館の遺跡調査で明らかになった旧一乗谷川の平面図の一部である。川幅は7.5m~12mであった。

図3は旧一乗谷川の断面図である。堤防の高さは3m~4mであった。iRICで入力した旧一乗谷川の河川断面は川幅20m、高さ1.125mとした。また、舟の停泊に使用していた大型の杭が出土した。

戦国時代の一乗谷における物流の手段は和舟であった。当時の和舟は平底であった。そのため、浅い水深であっても、川のは行き来は可能であった^{文献4), 5)}。このように、旧一乗谷川の河川断面は現在の一乗谷川の場合と比べて小さいものであった。

2.2. 降雨量モデルについて

戦国時代の降水量はこれまでに発掘された遺跡資料などで確認できない。そのため、iRICに入力する降雨量モデルは2008年7月8日に福井地方気象台で計測された大雨時の降水量を用いて算出した。

図4は降雨量モデルであり、計測間隔は10分間である。図中の降水量は、10分間の積算降水量を1時間の積算値で基準化したものである。

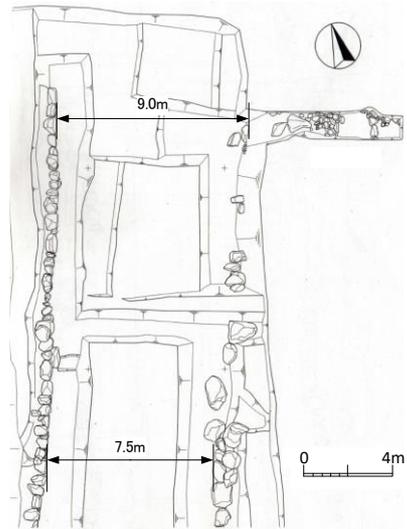


図2 旧一乗谷川の平面図

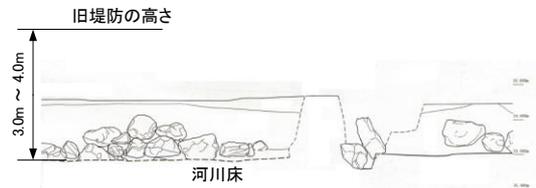


図3 旧一乗谷川の断面図

2.3. iRICによる広域モデル解析の条件について

表1はiRICによる広域モデル解析の主な条件を示す。本研究で用いたiRICの空間メッシュ数は27.3万個である。メッシュのサイズは10m×10mである。そのため、旧一乗谷川の川幅は2つ以上のメッシュで再現した。

1時間の旧一乗谷川の水深変化などを解析するために要する時間は約0.5時間であった。使用した解析PCのCPUはIntel Core i7-8700 (3.2 GHz 6コア)であり、内部メモリは32GBである。

2.4. STREAMによる狭域モデル解析の条件について

表2はSTREAMの主な解析条件を示す。本研究で用いたSTREAMの空間メッシュ数は約337.6万個である。そのため、100秒後の水の流れを解析するために要する時間は約24時間であった。使用した解析PCのCPUはIntel Core i9-10900X (3.7GHz 10コア)であり、内部メモリは64GBである。STREAMのソルバーで用いたコア数は8コアである。

図5は旧一乗谷川流域を再現した3D地形モデルである。旧一乗谷川における主な河川断面は9m×4mである。旧一乗谷川流域の3D地形モデルは、表1に示す数値標高モデルを基に作成した。河川断面の高さは河床の標高を上昇させ、3.5m~4.0mとし、川幅は12m以下となるように調整した。

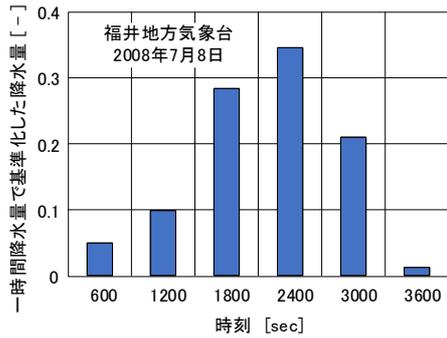


図4 降雨量モデル (福井地方気象台, 2008年7月8日)

表2 STREAMによる狭域モデル解析の主な条件

No.	事項	内容
1	流体領域	空気(非圧縮, 20°C) 水(非圧縮, 20°C)
2	水の計算方法 (自由表面)	非定常解析 MARS法(Multi-interface Advection and Reconstruction Solver)
3	自由表面の圧力の 補正方法	SIMPLER法
4	自由表面の壁面上 の接触角(全体)	15度
5	解析領域	677m × 873m × 200m
6	空間メッシュ数	3,376,666個(113 × 134 × 223)

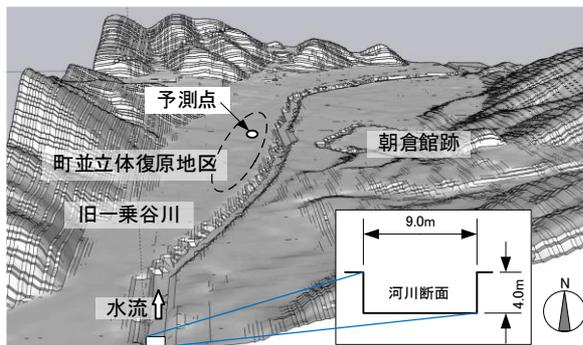


図5 旧一乗谷川流域の3D地形モデル (SketchUp Pro 2021で作成)

3. 解析結果

3.1. iRICによる広域モデル解析の結果

図6は旧一乗谷川における最大水深の分布である。この時の1時間降水量が100mmである。旧一乗谷川の源流が複数存在し、一乗谷周辺に降った雨水が一乗谷川に集まっていることがわかる。

図7は旧一乗谷川における1時間降水量と最大流速の関係を示す。1時間降水量は50mm, 100mmおよび150mmの3ケースである。図中の最大流速は旧一乗谷川の予測域の中心における予測値である。図に示すように、1時間降水量と最大流速は比例関係であることがわかる。

図8は旧一乗谷川の予測域における最大水深の分布である。この時の1時間降水量は50mmである。

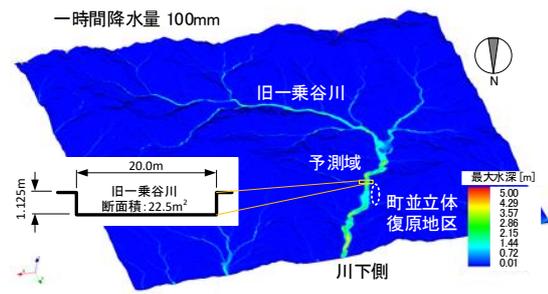


図6 1時間降水量100mmの最大水深の分布 (iRICによる広域モデル解析)

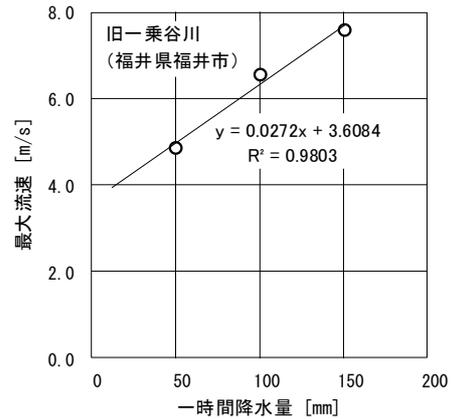


図7 予測域における1時間降水量と最大流速の関係 (iRICによる広域モデル解析)

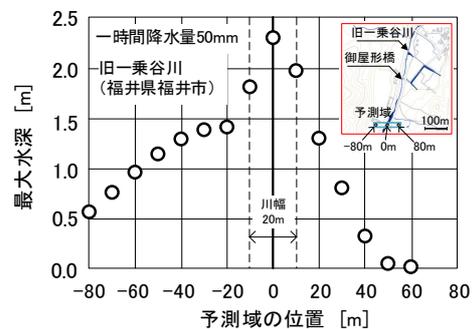


図8 予測域における最大水深の分布 (iRICによる広域モデル解析, 1時間降水量50mm)

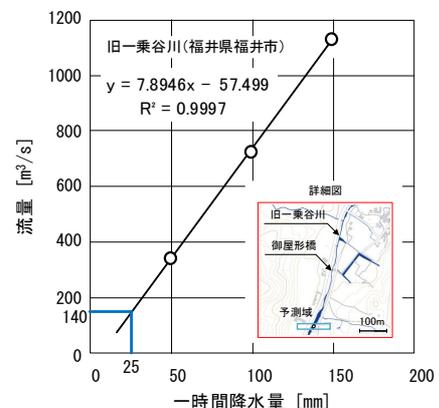


図9 1時間降水量と旧一乗谷川の流量の関係 (iRICによる広域モデル解析)

表3 狭域モデル解析の入力条件(一部)

ケース名	A	B	C	D
1時間降水量 [mm/h]	25	50	100	150
吐水面の幅 [m]	9	9	9	9
吐水面の高さ [m]	3.6	7.5	12.9	16.3
吐水面の流速 [m/s]	4.3	5.0	6.3	7.7
吐水面の流量 [m ³ /s]	139.9	337.2	732.0	1126.7

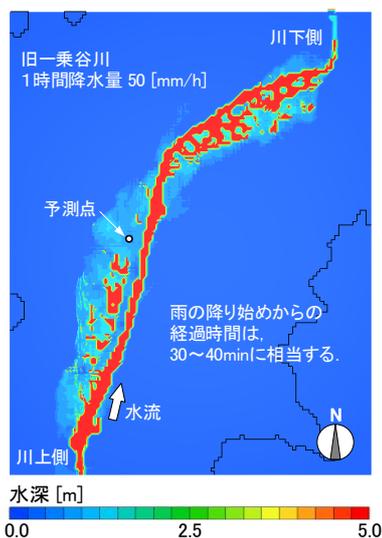


図10 旧一乗谷川流域における水深分布 (STREAMによる狭域モデル解析)

図中の横軸のマイナス側は旧一乗谷川の西岸である。

図9は旧一乗谷川における1時間降水量と流量の関係を示す。流量は空間メッシュの流速、メッシュ幅および水深を乗じたものである。図に示すように、1時間降水量と流速は比例関係であることがわかる。

3.2. STREAMによる狭域モデル解析の結果

表3は狭域モデル解析の入力条件の一部である。これは広域モデル解析の結果を用いて、旧一乗谷川の流量を設定したものである。狭域モデル解析で用いた吐水面は図5の解析領域の川上面に設定した。吐水面の幅は9mとし、吐水面の流速は図7から算出した。吐水面の流量は図9から算出し、吐水面の高さは上記の幅と流速で除したものである。解析時間は100secとした。なお、解析時間が100sec以上であっても、予測点の水深は、概ね同じであった。

図10はケースBの旧一乗谷川における最大水深の分布を示す。この時の1時間降水量は50mmである。雨の降り始めからの経過時間は30min~40minに相当する。旧一乗谷川から氾濫した水は西岸に到達している。

図11はケースA~Dの旧一乗谷川の西岸にある予測点における1時間降水量と水深の関係を示す。

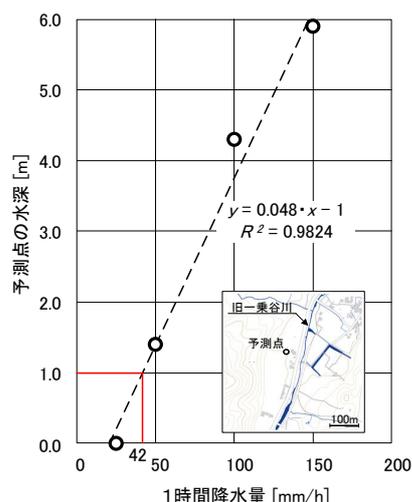


図11 予測点における1時間降水量と水深の関係 (STREAMによる狭域モデル解析)

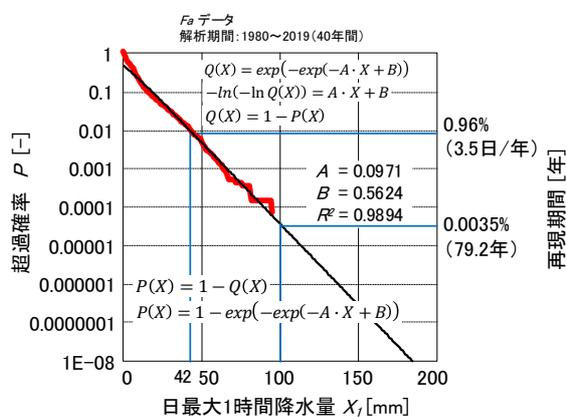


図12 福井県における日最大1時間降水量の再現期間

図中に示すように、1時間降水量と流速は比例関係であることがわかる。写真1に示す石垣高さ1mに達する1時間降水量は42mmとなることがわかる。

3.3. 旧一乗谷川における外水氾濫の再現期間

図12はFaデータを用いて作成した福井県における日最大1時間降水量の超過確率と再現期間を示す。図中に示すように1時間降水量42mmの超過確率は0.96%であることがわかる。つまり、この大雨は毎年発生し、1年間の発生日数は3.5日となる。

4. まとめ

本研究は1573年の朝倉氏滅亡直後の氾濫時の降水量と外水氾濫の再現期間を明らかにし、以下に得られた知見を示す。

- ① 一乗谷川の西岸にある復原町並の石垣の高さは地面から約1mである。この高さに水が達する場合の1時間降水量は42mmであることがわかった。

② 戦国時代の一乗谷において、復原町並の土塀の石垣は氾濫した水の備えであると想定した場合、外水氾濫は1年間で3.5日発生することがわかった。

以上から、一乗谷川の西岸にある復原町並における石垣の高さから外水氾濫の再現期間を逆算した結果、戦国時代の一乗谷川は頻繁に氾濫していることがわかった。

今後、資料館による遺跡調査は地震との関連性に加えて、外水氾濫の痕跡にも着目して実施される。これにより、考古学の研究分野において新たな知見が得られ、一乗谷朝倉氏遺跡に対する関心が国内外で高まるものと考えられる。

5. 注釈

注1) *Fa* データについて

図13は、*Fa* データの作成に用いた福井県とその周辺の20点の観測点の位置を示す^{文献6)}。

図14は、福井県の降雨強度式における15の適用地域を示す。表4は、*Fa* データと福井県の降雨強度式による確率降水量を比較したものである。参考として、近年、日本国内で頻発している1時間降水量100mmの大雨は福井県内では79.2年に1回発生することになる^{文献7)}。

6. 謝辞

本研究は、科学研究費助成事業（基盤研究(C)、課題番号：20K04863、代表者：野々村善民）と2021年度近畿建設協会研究助成（代表者：野々村善民）を受け、福井県立一乗谷朝倉氏遺跡資料館（文化財調査員 宮崎 認氏、藤田若菜氏）から遺跡調査資料の提供を受けた。また、全国トース技術研究組合（国土交通大臣認可、国官技第236号）などから多大な支援を得た。本報の作成に当たって、多大な協力を頂いた関係各位に心から謝意を表します。

[参考・引用文献]

- 1) 根元裕樹, 泉 岳樹, 中山大地, 松山 洋: 備中高松城水攻めに関する水文学的研究 —洪水氾濫シミュレーションを用いて—, 地理学総論 86-4, pp. 315-pp. 337, 2013年
- 2) 根元裕樹, 中山大地, 松山 洋: 洪水氾濫シミュレーションを用いた信玄堤の治水能力の再評価 —御勅使川沿いの治水施設群に着目して—, 地理学総論 84-4, pp. 553-pp. 571, 2011年, 2019年
- 3) 高橋未紗, 山貫緋称, 野々村善民: 都市洪水の予測システムに関する研究開発 市街地における内水氾濫の解析結果, 日本建築学会・情報システム技術委員会 第41回情報・利用・技術シンポジウム 2018 論文集, pp. 326-331, 平成30年(2018年)12月7日



図13 *Fa* データの作成に用いた各観測点の配置図 (福井県とその周辺の20点)^{文献4)}

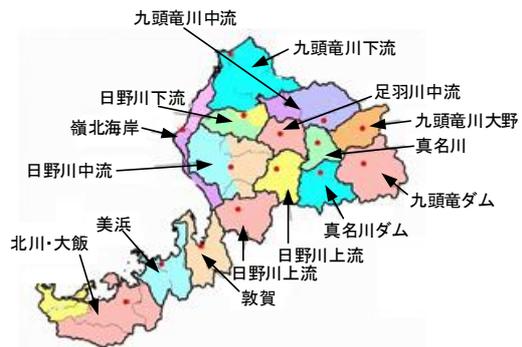


図14 福井県の降雨強度式のブロック分割図^{文献5)}

表4 各データの確率降水量の比較^{文献5)}

データの 種類	日最大1時間降水量 X_T [mm]		
	再現期間 2年	再現期間 50年	再現期間 100年
<i>Fa</i> データ	62	96	103
九頭竜川下流 <福井>	38	67	74
北川・大飯 <小浜>	36	67	74

- 4) 岩本才次: 昔の日本の船事情, 日本航海学会誌 164 巻, pp. 24-46, 平成18年(2006年)6月
- 5) 京都市: 22 高瀬川, 2009 京都市(制作 京都市歴史資料館) ver. 1.10, 2009年
- 6) 岸本拓海, 野々村善民, 島脇優里, 達川宙輝: 福井県における確率降水量に関する研究(その1) 複数の1時間降水量データの相関性に関する検討, 日本建築学会・情報システム技術委員会 第43回情報・利用・技術シンポジウム 2020 論文集, pp. 308-311, 令和2年(2020年)12月7日
- 7) 達川宙輝, 野々村善民, 島脇優里, 岸本拓海: 福井県における確率降水量に関する研究(その2) 日最大1時間降水量の発生頻度の算出方法に関する検討, 日本建築学会・情報システム技術委員会 第43回情報・利用・技術シンポジウム 2020 論文集, pp. 312-315, 令和2年(2020年)12月7日