

〈ノート〉

地域総合化による琵琶湖・淀川流域の降水日および雨日継続特性の空間分析

矢澤 大志¹⁾, 庄司 絢音²⁾, 清水 聡行³⁾¹⁾ 東京大学 生産技術研究所
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 E-mail:yazawa@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp)²⁾ 立命館大学 理工学部
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail:s.ayane.8120@gmail.com)³⁾ 福山市立大学 都市経営学部
(〒721-0964 広島県福山市港町2-19-1 E-mail:t-shimizu@fcu.ac.jp)

概要

本研究は琵琶湖・淀川流域の過去40年の日降水量データを対象に、降水日および雨日の継続特性を分析した。また地域総合化を行い特性の地域差を検証した。イベント継続期間の分析では、2日以内に約90%以上の雨イベントが収束している実績から、流域の計画降雨継続時間は2日より短く設定する必要がある可能性を示した。また条件付き確率の推定によって、流域北部だけではなく東側から南東部にかけて特に雨日が継続しやすいことが明らかとなった。本研究の手法は、洪水管理の計画降雨継続時間の設定根拠の一つとして有益な情報を提供できる。

キーワード：条件付き確率、計画降雨継続時間、地理情報システム、洪水リスク評価、クリギング

原稿受付 2023.5.31 原稿受理 2023.7.25

EICA: 28(2・3) 46-55

1. はじめに

近年雨の降り方が変化し大雨頻度の増加が観測され、気候変動によってさらに大雨の頻発や集中化、激甚化が起こることが懸念されている¹⁾。短時間の雨量の増大は深刻な洪水を引き起こす危険性があるため、降水強度の分析は洪水管理を行う上での重要な要素である。一方、1日から数日以上の長期的な降水は土壌水分量や地盤の緩みに影響するため、その継続日数も洪水や土砂災害の管理に必要とされる気象情報である²⁾。洪水管理・水文設計においては計画降雨継続時間を設定する上で、当該流域の代表的な降水継続日数を把握することが求められる。日本では現状、流域の実績降雨群や降雨一流出特性から総合的に判断され、2、3日の計画降雨継続時間が経験的に設定される場合が多く、海外でも24時間等が仮定的な計画降雨継続時間として使用している場合がある³⁻⁶⁾。

これまで降水量を基にした洪水リスク評価では、複数日の Probable Maximum Precipitation (PMP)^{7,8)} やパーセントイルベースの降水強度指標の計算⁹⁾ といった降水強度ベースの研究がある。これらの研究は地理情報システム (GIS) を用いた空間内挿による地域総合化を組み合わせ、空間的な洪水リスク評価も行っている。例えば本研究の対象地域である琵琶湖・淀川流域で行われてきた降水強度に基づく洪水リスク評価では、いずれの研究においても流域南東部（木津

川流域付近）で洪水リスクが高いことが示されている⁷⁻⁹⁾。降水強度指標に基づいた先行研究⁹⁾では琵琶湖・淀川流域周辺の61気象観測地点における2019年までの降水量データを前後半の二期間に分け、指標の空間分布と変化率を分析することで洪水リスクの相対変化を検証している。その結果、流域下流部（大阪付近）も近年洪水リスクが高まっていることを示している。

また洪水、渇水を対象とした空間的な水資源分析・評価では、気候モデルや Support Vector Machine (SVM) 等のモデルを活用する例が存在する¹⁰⁻¹²⁾。特に気候モデルを琵琶湖・淀川流域に導入した先行研究¹⁰⁾では、分布型流出モデルとの組み合わせで流域の水収支を月平均予測値や確率的な評価を基に議論し、琵琶湖周辺から枚方上流域までの水収支の減少可能性とその要因を報告している。これらの手法はより長期で多くの入力データを必要とする一方で、複数のシナリオを基にした詳細な水資源評価を行っている。

既往の研究では、降水イベントの起こりやすさ（発生確率）や時系列的な継続しやすさ（継続性）は考慮していない。しかし降水日の継続性や発生確率は災害管理の上で重要な気象情報であり、潜在的な災害リスク因子となりうる。そのため降水データに基づいた洪水リスクの評価でも、降水強度だけではなく降雨継続期間やその発生確率を考慮した上で頻度解析等を行い分析していくことが必要であるといえる。本研究では、

その発端として過去の琵琶湖・淀川流域の発生降水イベントについてその発生確率と降水日の継続性を基にリスク評価を行い、既往の降水強度ベースの評価⁹⁾とは異なる点から考察を行う。そしてGISを用いて発生確率と降水継続特性の地域総合化を行い、空間的なリスク評価へと展開する。既往研究の空間リスク評価で用いられる気候モデルは、環境場の統計的な特徴を再現することが目的であるため時系列を考慮した分析を行うことは難しい。またSVMのようなデータドリブン型の手法は長期の学習データを必要とし、観測データの限られる地域的な洪水管理への適用には現状限界がある⁹⁾。一方でGISを活用し、地域気象観測所のデータのみを用いて計算した指標の地域総合化によって空間分析を行うことは、よりも少ない入力データセットに対しても適用しやすい^{9,13)}。

また本研究はこれまで経験的な判断を含んでいた洪水管理・水文設計における計画降雨継続時間の設定方法の中でも、特に実績降雨群の分析に先行研究で使用されてきたConsecutive wet day^{2,14-16)}や条件付き確率^{16,17)}の概念を適用することで、より定量的な情報を提供する。分析の対象とする降水強度は気象庁で定義¹⁸⁾されている降水日(日降水量が1.0 mm以上)と雨日(同10.0 mm以上)に固定し、その発生頻度と継続性に着目する。本研究で行うイベントの継続性や条件付き確率を用いた降水継続特性の分析は、計画降雨継続時間の設定根拠として今後活用できる可能性がある。またGISを用いて様々な降水指標の地域総合化を試みることは、日本だけではなく国外でも様々な地域に存在する地域観測所データの利用可能性を広げることにつながる。

2. 研究方法

2.1 研究対象地域

本研究は三重県、滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県の2府4県をまたがる琵琶湖・淀川流域を対象とする(Fig. 1)。琵琶湖・淀川流域の流域面積は約8,240 km²であり、そのおよそ46.7%は琵琶湖流域、次いで木津川流域(19.4%)、桂川流域(13.3%)、淀川流域(9.8%)、宇治川流域(6.1%)、そして猪名川流域(4.7%)で構成されている¹⁹⁾。流域人口は2020年時点で約1,210万人であるが、流域の周辺府県を含め関西地域のおよそ1,700万人の生活用水として利用されている²⁰⁾。

琵琶湖・淀川流域下流には大阪市や京都市といった都市部が広がり、高強度の降水頻度が増加していることで洪水に対して相対的に脆弱な地域が存在する⁹⁾。気候変動影響を含めた大雨洪水災害へ適応していくに

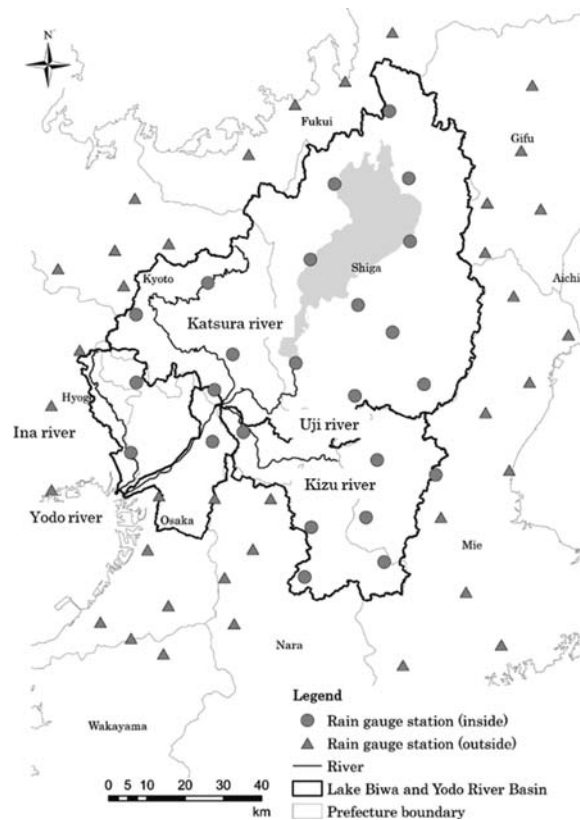


Fig. 1 Location of the Lake Biwa and Yodo River Basin, Japan. This research collected precipitation data at the circle and triangle points which are the rain gauge stations inside (24 stations) and outside (37 stations) the basin, respectively.

は、上下流の連携や自治体間の協力といった流域全体の利害関係者と民間部門、そして住民を含めた統合的湖沼流域管理(ILBM)が必要であり、琵琶湖・淀川流域はILBMの実践地域としてそのガバナンスが様々な先行研究で検証されている²¹⁻²⁴⁾。

2.2 降水量データの整備

本研究では、Fig. 1で示す琵琶湖・淀川流域内およびその周辺に存在する61の気象観測地点(流域内24および流域外37)において、気象庁²⁵⁾が公開している1983~2022年(過去40年分)の日降水量データを収集し解析へ利用した。Table 1に対象とした気象観測地点を示す(3.1節の結果を含む)。気象観測地点の選択基準は先行研究⁹⁾を参照し、観測開始年が1990年以降で比較的新しい流域内の4地点(米原、朽木平良、茨木、八尾)や流域近郊の地点(西宮、吉野など)については本研究のデータ収集と解析からは除外した。また本研究ではデータ欠損日の降水量は補完せず、該当数値なしの日として取り扱った。なお、奈良県の葛城と和歌山県のかつらぎの2地点についてはローマ字表記が同一となるため、図表中ではそれぞれKatsuragiとKatsuragi_wと表記を区別している。

Table 1 List of the rain gauge stations selected in this research. Slope shows the results of the trend analysis of rainfall characteristics discussed in subsection 3.1

Observatory	Slope				Observatory	Slope			
	Precipitation	Wet day	Rainy day	SDII		Precipitation	Wet day	Rainy day	SDII
Tarumi	6.3	-0.6**	0.0	0.1*	Shuuchi	3.5	-0.4*	0.0	0.1**
Ibigawa	6.1	-0.2	0.1	0.1*	Sonobe	1.6	0.0	0.0	0.0
Sekigahara	4.0	-0.2	0.1	0.1	Keihoku	7.9*	-0.3	0.2	0.1***
Ogaki	6.8	-0.2	0.2	0.1**	Kyoto	3.9	0.1	0.1	0.0
Kamiishizu	9.1*	-0.2	0.2	0.1***	Nagaokakyo	1.3	-0.1	0.0	0.0
Hokusei	2.8	-0.4*	0.0	0.1*	Kyotanabe	8.2*	-0.1	0.2	0.1**
Kuwana	3.6	-0.3	0.2	0.1*	Nose	7.0	-0.1	0.1	0.1*
Yokkaichi	7.0	0.1	0.2	0.1	Hirakata	5.7	-0.1	0.1	0.1*
Kameyama	1.8	-0.1	0.1	0.0	Toyonaka	4.5	-0.1	0.1	0.1*
Ueno	5.6	0.0	0.2	0.1*	Osaka	5.5	0.1	0.1	0.1
Kasatoriyama	11.7*	1.0**	0.5**	-0.1	Ikoma	5.8	-0.3*	0.1	0.1**
Tsu	2.7	0.1	0.2	0.0	Sakai	4.5	-0.2	0.1	0.1**
Nabari	6.4*	-0.2	0.1	0.1**	Kawachinagano	9.6**	-0.1	0.2	0.1***
Hakusan	7.2	0.0	0.1	0.1	Kumatori	6.6	-0.2	0.2	0.1**
Kayumi	10.0	-0.1	0.2	0.1*	Shitsukawa	6.5	-0.4*	0.1	0.1**
Fujisakatoge	25.5***	0.9**	0.7***	0.1	Sanda	3.5	-0.1	0.0	0.1*
Miyagawa	12.7	-0.1	0.2	0.1	Kobe	6.1	0.0	0.1	0.1
Yanagase	8.4	-0.3	0.1	0.1**	Nara	5.3	0.1	0.2	0.0
Imazu	9.5*	-0.3*	0.3*	0.1***	Hari	6.2	-0.3	0.1	0.1**
Nagahama	7.5*	-0.1	0.2	0.1**	Tawaramoto	6.5*	-0.2	0.2	0.1***
Minamikomatsu	0.4	-0.5*	0.1	0.1*	Soni	12.4*	-0.1	0.3*	0.1**
Hikone	3.9	-0.1	0.1	0.0*	Katsuragi	17.1***	1.0**	0.5***	0.0
Omiyachiman	3.5	-0.3	0.1	0.1**	Ouda	7.4*	-0.2	0.2	0.1***
Higashiomi	3.2	-0.3*	0.2*	0.1**	Gojo	4.1	-0.2	0.1	0.1*
Otsu	2.5	-0.2	0.1	0.1*	Katsuragisan	27.7***	1.4***	0.7***	0.1**
Shigaraki	6.0	-0.3	0.2	0.1**	Katsuragi_w	8.9*	0.4	0.2	0.1**
Tsuchiyama	-0.1	-0.4**	0.0	0.0	Imajo	4.5	-0.4*	0.0	0.1*
Mutsuyori	4.5	-0.3	0.0	0.0*	Tsuruga	6.8	0.0	0.1	0.0
Miwa	1.3	-0.5**	-0.1	0.1*	Mihama	5.6	-0.3	0.0	0.1*
Honjo	2.5	-0.4*	-0.1	0.0*	Obama	2.9	-0.4*	-0.1	0.0
Miyama	2.6	-0.4*	0.0	0.1*					

(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

2.3 降水特性の傾向分析

2.3.1 降水指標

本研究でははじめに年降水量、年間降水日数、および年間雨日数の長期傾向を分析した。降水日（日降水量が 1.0 mm 以上）と雨日（同 10.0 mm 以上）の基準は気象庁¹⁸⁾の定義に従った。なお本論文では、これらの用語について図表中の英語表記を、降水日は Wet day、雨日は Rainy day として表記を区別している。長期傾向の分析では気象庁の長期変化傾向（トレンド）の算出方法とその評価方法²⁶⁾を参照し、各気象観測地点における過去 40 年の年降水量、年降水日数、および年雨日数の回帰直線の傾きを有意水準とともにそれぞれ計算した。また、降水日あたりの降水量を示す Simple precipitation intensity index (SDII, 単位 mm)⁹⁾を計算し、同様に毎年の値と回帰直線の傾きを求めた。そして回帰直線の傾きが正であればその指標は増加傾向にあり、負であれば減少傾向にあると判断した。

2.3.2 イベントの継続日数

対象流域で降水日および雨日が継続する日数の傾向を把握するため、収集した 61 地点の過去 40 年分の日降水量の時系列データより、降水日と雨日が 1 日以上継続したイベントを抽出した。本研究ではそれぞれを降水イベント (Wet event) と雨イベント (Rain event) と表記を区別した。降水 (雨) イベントの抽出では、データ収集を開始した 1983 年 1 月 1 日から時系列順に日降水量データを確認し、ある日の日降水量が 1.0 mm/day (10.0 mm/day) の基準を超えた場合に降水 (雨) イベント日数のカウントをはじめた。その後さらに時系列順に日降水量の値を確認し、日降水量が 1.0 mm/day (10.0 mm/day) の基準を下回った時点で一つの降水 (雨) イベントの終了とした。そのためイベントの継続日数は 1 日以上が対象となる。本研究では全地点で発生した降水 (雨) イベントの発生回数を集計し、地点ごとに過去のイベント継続日数の傾向を分析した。

2.3.3 条件付き確率

本研究では、複数日イベントの発生事象が確率的に独立か従属であるかを検証するため、各地点で降水日と雨日が連続する条件付き確率を計算した。条件付き確率を用いてその確率構造を解析することで、ある日の降水現象がその前日の天気（例えば降水日か、日降水量が1 mm未満の無降水日か）に依存しているかどうかを検証し、複数日の降水（雨）イベントの発生しやすさ、そして降水日・雨日の継続しやすさを確認することができる^{16,17,27}。

本研究では先行研究^{17,27}に倣い降水日の条件付き確率を計算し、その手法を雨日にも適用した。ここで R および D をそれぞれ降水日と無降水日（雨日への適用の際には雨日と日降水量が10.0 mm未満の日）とし、任意の日の降水日と無降水日の確率は $P(R)$ および $P(D)$ と表すとす。このとき、条件付き確率は下記の式(1)～(4)で推定できる。

$$P(X_t=R|X_{t-1}=D)=\frac{P(R\cap D)}{P(D)} \quad (1)$$

$$P(X_t=R|X_{t-1}=R)=\frac{P(R\cap R)}{P(R)} \quad (2)$$

$$P(X_t=D|X_{t-1}=R)=\frac{P(D\cap R)}{P(R)} \quad (3)$$

$$P(X_t=D|X_{t-1}=D)=\frac{P(D\cap D)}{P(D)} \quad (4)$$

式(1)～(4)で、 t は時間を示す。本研究の場合は日降水量データを使用しているため、 X_t は任意の日を示す。

そして、下記の条件式(5)と(6)が成立する場合、降水日(R)と無降水日(D)は確率的に独立である。

$$P(X_t=R|X_{t-1}=D)=P(R) \text{ if } P(D)>0 \quad (5)$$

$$P(X_t=D|X_{t-1}=R)=P(D) \text{ if } P(R)>0 \quad (6)$$

本研究は琵琶湖・淀川流域における複数日の降水（雨）イベントの発生に着目した。そのため連続降水日（雨日）の条件付き確率を推定するために、降水日（雨日）の頻度に主に式(2)を適用した。先行研究²⁷によって説明されている条件付き確率の説明に基づく、対象地点の降水日が独立している場合（前日の降水状況に依存していない場合）、 t 日目における条件付き確率の値は $t-1$ 日目と変わらず一定となる。

2.4 地理情報システム (GIS) を用いた地域総合化

本研究では前節まで求めた琵琶湖・淀川流域周辺の各気象観測地点における降水指標と条件付き確率の地域差を分析するために、GISを使用した空間内挿により琵琶湖・淀川流域内で地域総合化を行った。地域総合化は気象学・水文学的な観点から一様な性質をもつ

とみなし得る地域について、その地域内のデータの確率的特性を総合化し観測データの比較的少ない地点についてもその確率特性を利用できるようにする手法である^{28,29}。

先行研究でも流域内の空間的な洪水リスクを評価するために、空間内挿法を適用した地域総合化が行われており^{9,28,29}、本研究で使用したクリギング法はArcGIS 10.8で利用可能な地球統計学的空間内挿手法の一つである。他の空間内挿手法（例えばInverse Distance WeightingやNatural Neighborのような決定論的手法）に比べ、クリギング法は統計的モデルに基づいてデータポイントの空間的な自己相関を考慮するため、まばらに分散した気象観測地点のようなデータへも適用性が高い³⁰⁻³⁴。

Fig. 1のように、琵琶湖・淀川流域周辺の気象観測地点は不均等かつまばらに位置していることから、本研究ではクリギング法を適用した。なお、琵琶湖・淀川流域で降水強度指標に基づく地域総合化を行った先行研究⁹に倣い、本研究でもSpherical semivariogramを用いた通常型のクリギング法による空間内挿を行い、イベントの継続期間に着目した本研究との結果の比較も行った。

3. 結果と考察

3.1 降水指標の傾向分析

分析対象とした各気象観測地点における降水指標（年降水量、年降水日数、年雨日数、およびSDII）の回帰直線の傾きを求めた結果をTable 1に示す。本研究における各降水指標の傾向分析は過去40年だけのデータ利用のため、特に年降水量、年降水日数、および年雨日数に関しては統計的有意性を確認できる地点が少ない。今後、長期の変動傾向を正確に分析するためには、新たなデータの追加や長期のデータを使用して統計的有意性を再検定する必要がある。

以上の点に留意し本研究で求めた各指標の回帰直線の傾きの結果をみると、多くの地域で年降水量は増加傾向を示すが、降水日数は減少傾向を示していることから、降水日あたりの降水量は年々増加していることが示唆される。そこで年降水量を年降水日数で除したSDIIの指標の変動傾向を回帰直線の傾きで評価すると、わずかに増加傾向があることが示された。一方で雨日数は過去40年でわずかながら増加傾向があることから、10 mm以上の日降水量を記録する日数が増えている地点が多いことがわかる。

それぞれの降水指標の40年平均値を空間内挿した結果をFig. 2に示す。対象とした気象観測地点の中では、年平均降水量は最小1,229.5 mm（大阪・堺）から最大3,293.3 mm（岐阜・樽見）、年平均降水日数

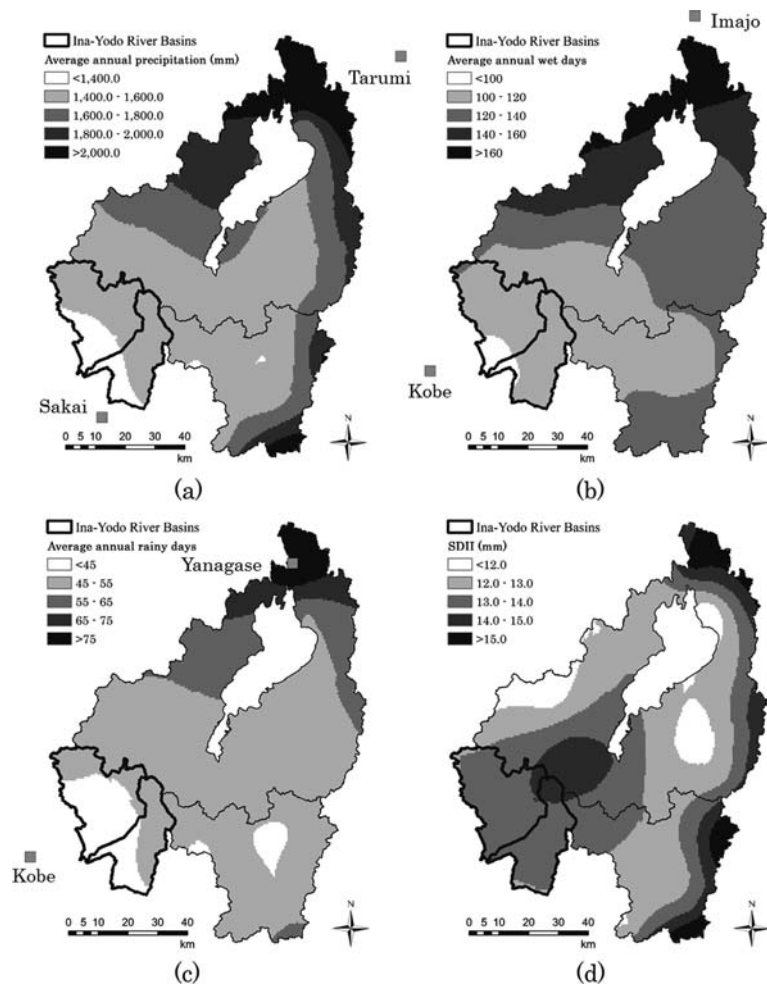


Fig. 2 Spatial distribution of (a) the average annual precipitation, (b) the average annual number of wet days, (c) the average annual number of rainy days, and (d) SDII in the Lake Biwa and Yodo River Basin from 1983 to 2022. Gray square points indicate the stations recorded the maximum or minimum of each precipitation index.

は最小 93.2 日（兵庫・神戸）から最大 179.2 日（福井・今庄），そして年平均雨日数は最小 39.4 日（兵庫・神戸）から最大 90.6 日（滋賀・柳ヶ瀬）の間で分布している。地域総合化を行うことによって，年降水量 [Fig. 2 (a)]，降水日数 [Fig. 2 (b)]，および雨日数 [Fig. 2 (c)] の平均値はいずれも流域北部（滋賀県北部）では高い値を，下流付近（淀川，猪名川流域）では比較的低い値を示すという類似した地域差があることがわかる。一方，SDII [Fig. 2 (d)] は異なる空間分布を示しており，降水日あたりの降水量は琵琶湖北部だけではなく，流域の東側から南東側にかけて，また宇治川からその下流にかけても比較的高いことが明らかとなった。

3.2 イベント継続日数の分析

Fig. 3 と Fig. 4 に，7 日までの降水日および雨日継続期間毎のイベント発生頻度と累積構成比を集計した結果をそれぞれ示す。なおイベント発生頻度は地域差があるため，累積構成比（第 2 軸）は対象 61 地点の平均（点線）と，最小値を記録した地点から最大値を記録した地点の結果を範囲で示した。Fig. 3 では，平

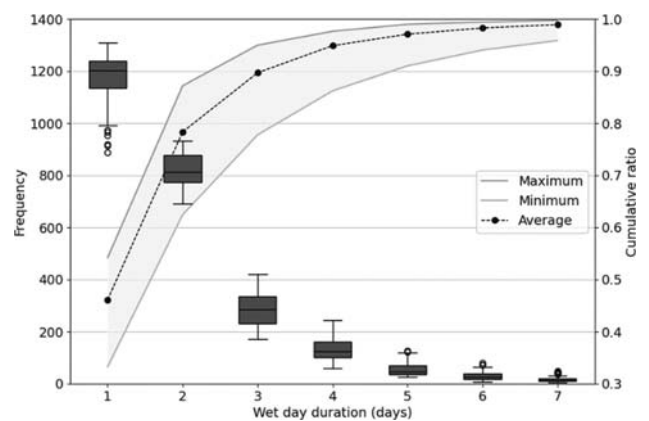


Fig. 3 Frequency (boxplots) and cumulative ratio (line graphs) of wet events corresponding to 1-7 wet day durations. Open circles indicate outliers.

均で約 45% の降水イベントが 1 日で終了しており，約 55% が 2 日以上複数の日イベントであることがわかる。そして約 90% の降水イベントは 3 日以内で収束しており，降水日は長くても 1 週間程度で終わることがわかる。また，より高強度の雨が続く雨イベントについて (Fig. 4) は，平均して約 75% が 1 日で終了し，約 90% 以上のイベントが 2 日以内には収束して

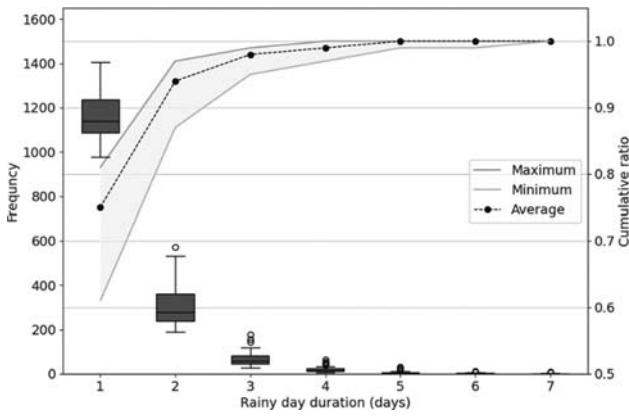


Fig. 4 Frequency (boxplots) and cumulative ratio (line graphs) of rain events corresponding to 1-7 rainy day durations. Open circles indicate outliers.

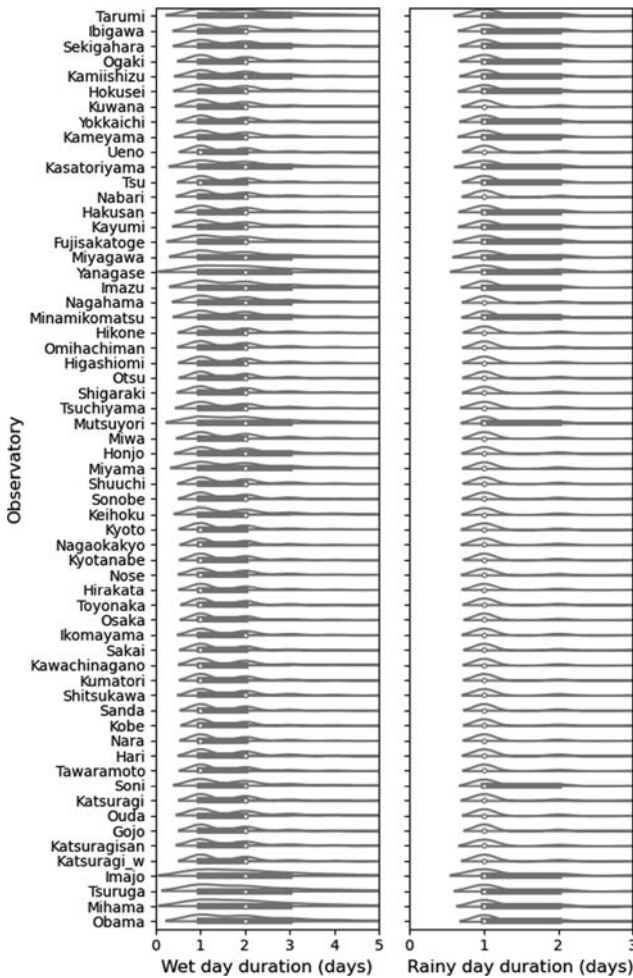


Fig. 5 Frequency of wet and rain events corresponding to 1-7 wet day durations at 61 rain gauge stations. A white circle indicates the median of event duration. A gray bar at each rain gauge station has the same meaning as a boxplot.

いる。

降水、雨イベントともに各地点でどの日数のイベントが多い傾向にあるか、そしてその地域差をみるため、各地点の継続期間毎のイベント頻度を確率密度で比較しているものが Fig. 5 である (図中の塗りつぶしバーは箱ひげ図と同様の意味を持ち、白丸は中央値を示す)。地点ごとの結果をみると、Fig. 2 で各降水指

標の高い値を示した流域北部周辺 (滋賀県、福井県、岐阜県) の気象観測地点は降水、雨イベントともに長くなる傾向がわかる。降水イベントは、滋賀県北部 (宮川、柳ヶ瀬、今津、長浜、南小松) および琵琶湖・淀川流域外部の北側に隣接している福井県の4地点や岐阜県の2地点 (関ヶ原、上石津) 等で2日以上継続するケースが多く、一方で下流部の大阪や京都では1日で終わるケースが多い。より高強度の雨日が続く雨イベントについては、全ての地点で継続期間の中央値が1日を示している。その中で滋賀県北部と福井県および琵琶湖・淀川流域外部の東側の岐阜県から三重県の気象観測地点については2日程度の雨イベントが生じる頻度が他の地点よりも多いことが明らかとなった。

以上の結果によって、琵琶湖・淀川流域内では日降水量が1mm以上の降水日は2日以上続くケースが多いが、4日以上継続することは少ないということがわかった。一方で、より高強度の降水量が続く雨イベントは、過去40年の実績上複数日となった場合は少ないことが明らかとなった。実際に洪水を引き起こすイベントは、雨日の定義よりさらに高い降水強度に起因することが考えられることから、琵琶湖・淀川流域における計画降雨継続時間は2日より短く設定される必要があると考えられる。

3.3 条件付き確率の分析

Fig. 6 に全気象観測地点における複数日の降水日および雨日が続く条件付き確率を推定し集計した結果を示す。また Fig. 7 は3日目までの降水日 [(a)~(c)] および雨日 [(d)~(f)] が連続する条件付き確率の分布を示している。ここで降水日/雨日の1日目の発生確率は期間全体 (1983~2022年) の日数に対する降水日/雨日の発生日数の割合と等しい。

Fig. 6 において、過去40年間における降水日1日目の発生確率は0.26 (兵庫・神戸)~0.49 (滋賀・柳ヶ瀬および福井・今庄) の範囲で分布している。Fig. 7

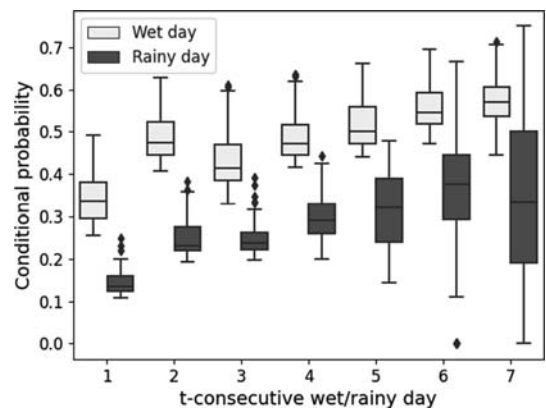


Fig. 6 Probability distribution of consecutive wet/rainy days in the Lake Biwa and Yodo River Basin. Closed circles indicate outliers.

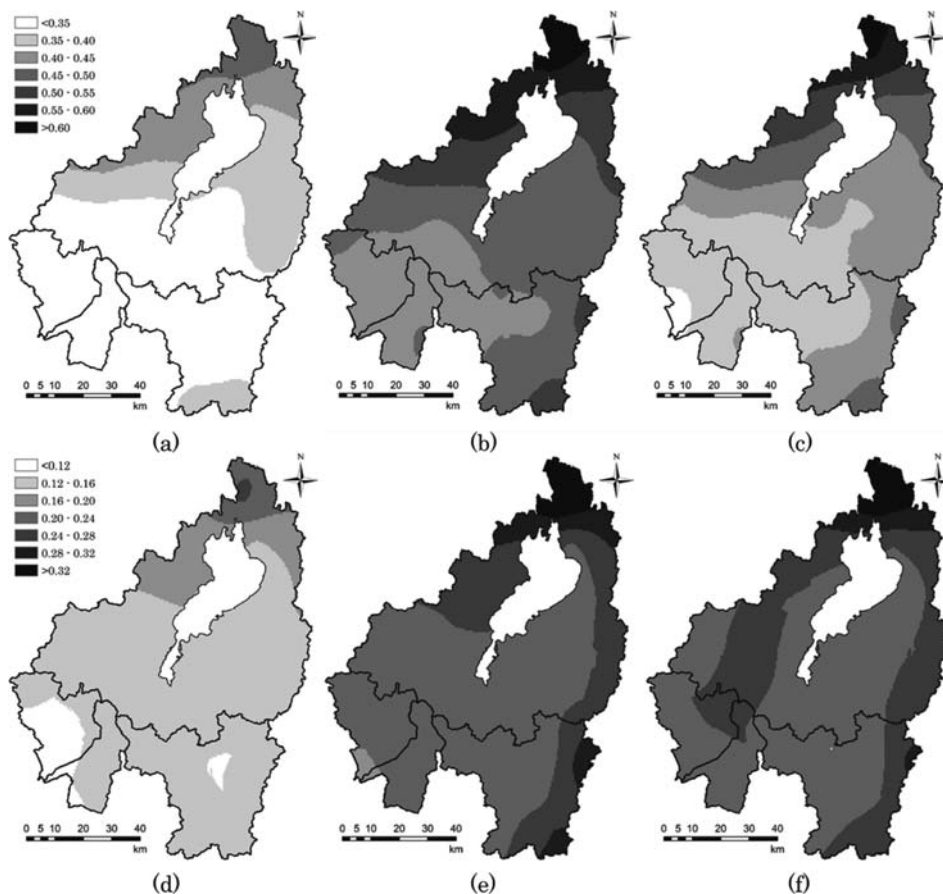


Fig. 7 Spatial distribution of (a) the probability of a single wet day, (b) the conditional probability of 2 consecutive wet days, (c) the conditional probability of 3 consecutive wet days, (d) the probability of a single rainy day, (e) the conditional probability of 2 consecutive rainy days, and (f) the conditional probability of 3 consecutive rainy days in the Lake Biwa and Yodo River Basin.

(a) で空間分布を確認すると、より多く降水日を記録している滋賀県北部から、京都、大阪方面の流域下流部に行くにつれて発生確率は低くなっている。また雨日1日目の発生確率 (Fig. 6) は0.11 (大阪・豊中、堺など複数地点)~0.25 (滋賀・柳ヶ瀬) の範囲で分布しており、その空間分布 [Fig. 7 (d)] は降水日同様、滋賀県北部から下流域にかけて低くなっている。

降水日および雨日の両方で2日目の確率は増加していることから (Fig. 6)、降水日/雨日が1日発生した場合には翌日も降水日/雨日となる確率は高くなるのがわかる。一方、3日目になると降水日、雨日ともに条件付き確率は若干減少するため、イベントは継続しにくい傾向にある。また降水日の2、3日目の確率の空間分布 [Fig. 7 (b) および (c)] では、Fig. 7 (a) でみられた地域差の傾向を保持したまま確率が変動しているのがわかる。しかし、雨日の条件付き確率の空間分布 [Fig. 7 (e) および (f)] は、2日目、3日目に変化がみられる。流域の東側から南東側にかけては、1日の雨日が発生した場合、2日目の雨日の確率は高くなり、さらに3日目は桂川周辺の確率も高くなる。そのため、雨日、つまり高強度の降水日の発生に関わる条件付き確率の結果では、流域北部だけではなく琵琶湖東側から流域南東側にかけてもリスクが

高くなった。そして日降水量が多い雨日の発生と継続しやすさについては、降水日とは異なる地域差が生じることが明らかとなった。

Fig. 6において、4日目以降の降水日、雨日の条件付き確率についても地域差はあるものの変化をしていることが確認され、全体として琵琶湖・淀川流域では降水日/雨日の独立性は低いことを示している。つまり流域では、降水日/雨日の発生が、その前日の現象に依存し、また翌日の現象にも影響を与えていることが示唆された。一方で本研究の条件付き確率の計算では、降水日から降水日、もしくは雨日から雨日の継続性を検証しているため、降水日から雨日 (または雨日から降水日) のようなより現実的かつ頻繁に起こりうる事象は降水日の条件付き確率の結果の中に含まれている。そのため今後はより降水日と雨日の中間的な降水強度を設定し計算を行うことや、雨日より高強度の降水を考慮した複数パターンでの分析も必要である。

複数日のPMPや1日確率降水量とその再現期間の歴史的变化を基にリスク評価を行った先行研究⁷⁻⁹⁾では、流域北部や流域南東部 (木津川流域) だけではなく、下流域 (大阪付近) もリスクが高いことが報告されている。一方で、降水イベントの発生確率や継続性に着目した本研究の結果では、下流域ではとりわけ高

いリスクは確認されなかったが、琵琶湖の東側から流域南東部にかけてリスクが高くなった。以上の結果より、降水データに基づいた洪水リスク評価や洪水管理・水文設計の際には、降水強度だけでは判断せず、本研究手法と組み合わせて降雨継続期間とその発生確率や継続性を考慮した上で分析していくことが重要であるといえる。

4. おわりに

本研究では琵琶湖・淀川流域において、過去40年の日降水量の時系列データを用いて降水日と雨日の継続特性を分析した。また、GISを用いて地域総合化を行うことで、流域内の降水継続特性の地域差を検証した。過去のイベント継続期間の分析では、2日以内には約90%以上の雨イベントが収束している実績から、実際に洪水を引き起こしうる高降水強度のイベントが複数日となる続く可能性は低く、琵琶湖・淀川流域における計画降雨継続時間は2日より短く設定される必要があることが示唆された。また条件付き確率の推定結果によって、流域北部では複数日の降水、雨イベントがどちらも起こりやすく、流域東側から南東部にかけては雨日が継続しやすいことが明らかとなった。本研究のようにイベント継続期間の傾向や条件付き確率を分析することは、これまで経験的な判断を含んでいた実績降雨群等から計画降雨継続時間を設定する際の定量的な根拠の一つとして有益な情報となりうる。

今後の課題として、本研究ではデータ欠損日の降水量は補完せず該当数値なしの日として取り扱っているが、降水量やイベント発生回数の結果に影響するため、再解析の気象データ等を用いて欠損日の値を補完する必要がある。また地域総合化にはクリギング法のみを適用したが、対象とする降水特性や指標、気象データの利用可能状況に応じて適切な空間内挿方法を検討することも重要である。そして実際の洪水管理へ向け流域の降雨一流出特性を考慮するため、水文モデルを組み合わせた研究を行う必要がある。

参考文献

- 国土交通省水管理・国土保全局：水害レポート2022(2023)
- 草薙浩：降水連続日数と一雨降水量から見た日本の降水特性の長期変化，*天気*，Vol. 65, pp. 25-34 (2018)
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: Technical Criteria for River Works: Practical Guide for Planning (2005)
- U.S. Federal Emergency Management Agency: Guidelines and Standards for Flood Risk Analysis and Mapping, <https://www.fema.gov/guidelines-and-standards-flood-risk-analysis-and-mapping> (2016) (Last access May 30, 2023)
- 竹島滉，芳村圭：日本の一級水系における計画降雨継続期間の妥当性に関する検証，*水文・水資源学会研究発表会要旨集*，Vol. 30, p. 40 (2017)
- T. Yazawa, S. Kim, K. Sato and Y. Shimizu: Estimation of Design Flood Criteria toward Integrated Watershed Management in the Johor River Watershed, Malaysia, *Journal of EICA*, Vol. 24, No. 2/3, pp. 22-31 (2019)
- N.E. Alias, P. Luo and K. Takara: Probable Maximum Precipitation using Statistical Method for the Yodo River Basin, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 69, No. 4, pp. I_157-I_162 (2013)
- N.E. Alias, P. Luo and K. Takara: A Basin-scale Spatial Distribution of Probable Maximum Precipitation for the Yodo River Basin, Japan, *Annual Report of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 56B, pp. 65-72 (2013)
- T. Yazawa and A. Shoji: Spatial Analysis of Historical Extreme Rainfall Characteristics using Regionalization in the Lake Biwa and Yodo River Basin, Japan, *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 14, pp. 916-936 (2023)
- 伊藤昌資，菅野豊，大八木豊，西澤諒亮，川瀬宏明，佐々井崇博，杉本志織，川崎将生，中北英一：気候変動が淀川水系の渇水リスクに及ぼす影響，*水文・水資源学会誌*，Vol. 33, No. 3, pp. 83-97 (2020)
- M. T. Sattari, K. Falsafian, A. Irvem, S. Shahab and S. N. Qasem: Potential of Kernel and Tree-based Machine-learning Models for Estimating Missing Data of Rainfall, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 14, pp. 1078-1094 (2020)
- W. Wang, Y. Du, K. Chau, H. Chen, C. Liu and Q. Ma: A Comparison of BPNN, GMDH, and ARIMA for Monthly Rainfall Forecasting based on Wavelet Packet Decomposition, *Water*, Vol. 13, 2871 (2021)
- P. Tomar, S. K. Singh, S. Kanga, G. Meraj, N. Kranjčić, B. Đurin, A. Pattanaik: GIS-Based Urban Flood Risk Assessment and Management—A Case Study of Delhi National Capital Territory (NCT), India, *Sustainability*, Vol. 13, 12850 (2021)
- N. S. Muhammad, P. Y. Julien and D. S. Jose: Probability Structure and Return Period of Multi-day Monsoon Rainfall, *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, ISSN 1084-0699/04015048 (11), pp. 04015048-1-04015048-11 (2015)
- N. S. Muhammad and P. Y. Julien: Multiday Rainfall Simulations for Malaysian Monsoons, *ISFRAM 2014 Proceedings of the International Symposium on Flood Research and Management*, pp. 111-120 (2015)
- T. Yazawa: Design Flood Criteria toward Integrated Watershed Management in the Johor River Watershed, Malaysia, PhD. dissertation, Kyoto University, Kyoto (2017)
- N. S. Muhammad, J. Abdullah and P. Y. Julien: Characteristics of Rainfall in Peninsular Malaysia, *Journal of Physics: Conference Series*, 1529, 052014 (2020)
- 気象庁：天気予報等で用いる用語，https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html (Last access May 30, 2023)
- 公益財団法人琵琶湖・淀川水質保全機構：http://www.byq.or.jp/kankyo/k_01.html (Last access May 30, 2023)
- 公益財団法人琵琶湖・淀川水質保全機構：BYQ水環境レポート——琵琶湖・淀川の水環境の現状——2021(2023)
- Y. Bamba: Integrated Basin Management in the Lake Biwa and Yodo River Basin, *Lakes & Reservoirs*, Vol. 16, pp. 149-152 (2011)

- 22) M. Nakamura and W. Rast: Development of ILBM Platform Process Evolving Guidelines Through Participatory Improvement, 2nd edn. Otsushigyo Photo Printing Co. Ltd., Otsu (2014)
- 23) N. Nakatsuka, S. Kosaka, K. Taki, M. Nakamura and H. Nakagawa: Better Governance for Integrated Management of the Lake Biwa-Yodo River Basin, *Lakes & Reservoirs*, Vol. 25, pp. 93-104 (2020)
- 24) Z. Sharip, S. Zakaria, M. N. M. Noh, M. Nakamura and V. Muhandiki: A Review of the Importance, Gaps and Future Directions of Integrated Lake Basin Management Planning in Malaysia, *Lakes & Reservoirs*, Vol. 26 (2021)
- 25) 気象庁：過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (Last access May 30, 2023)
- 26) 気象庁：気候変動監視レポート 2022 (2023)
- 27) N. S. Muhammad: Probability Structure and Return Period Calculations for Multiday Monsoon Rainfall Events at Subang, Malaysia. PhD. dissertation, Colorado State University, Colorado (2013)
- 28) 宝馨, 岡明夫：回帰分析及び kriging による確率雨量の地域総合化, *土木学会論文集*, No. 456, II-21, pp. 1-10 (1992)
- 29) 真野明, 中山亮二：地域総合化による確率雨量の空間分布の推定, *水工学論文集*, Vol. 52, pp. 217-222 (2008)
- 30) 橋本識秀, 堀田哲夫, 佐藤康晴, 星清：Kriging 法を用いたレーダ雨量の補正, *水文・水資源学会誌*, Vol. 7, No. 5, pp. 441-419 (1994)
- 31) N. Mantzafleri, A. Psilovikos and A. Blanta: Water Quality Monitoring and Modeling in Lake Kastoria, Using GIS. Assessment and Management of Pollution Sources, *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 3221-3254 (2009)
- 32) ESRI ジャパン：ArcGIS ユーザーのための内挿法ガイド, ESRI ジャパン株式会社 (2018)
- 33) S. Das: Extreme Rainfall Estimation at Ungauged Sites: Comparison between Region-of-influence Approach of Regional Analysis and Spatial Interpolation Technique, *International Journal of Climatology*, Vol. 39, pp. 407-423 (2019)
- 34) C. G. Catalini, N. F. Guillen, F. M. Bazzano, C. M. García and M. M. Baraquet: Web Mapping of Extreme Daily Rainfall Data in Central and Northern Argentina, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 26, No. 7, pp. 05021013-1-05021013-12 (2021)

Regionalization of Consecutive Wet and Rainy Day Characteristics in the Lake Biwa and Yodo River Basin, Japan

Taishi Yazawa^{1)†}, Ayane Shoji²⁾ and Toshiyuki Shimizu³⁾

¹⁾ Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

²⁾ College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

³⁾ Faculty of Urban Management, Fukuyama City University

† Correspondence should be addressed to Taishi Yazawa:

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

E-mail: yazawa@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract

Forty years of daily rainfall data series around the Lake Biwa and Yodo River Basin were analyzed to investigate the characteristics of consecutive wet/rainy days. Regionalization was conducted to reveal the regional differences in precipitation characteristics. The results revealed that more than 90% of the historical events with rainy days, in which rainfall amount is more than 10.0 mm, converged within 2 days. This indicated that the critical rainfall duration of flood management in the basin needs to be shorter than 2 days though the spatial difference should be considered depending on the region. Estimation of conditional probability revealed that particularly rainy days are likely to continue not only in the northern part but also in the eastern and southeastern parts of the basin. The methodology used in this research could provide useful information to determine the critical rainfall duration for local flood management in the basin.

Key words: conditional probability, critical rainfall duration, geographic information system, flood risk assessment, kriging