

流域地形と降雨の時空間パターンを考慮した 洪水発生ポテンシャルの評価

Assessment of Flood Potential in River Basins in Japan Considering Basin Geography and Rainfall Pattern

佐藤嘉展⁽¹⁾・泉智揮⁽¹⁾・野原大督⁽²⁾・佐山敬洋・角哲也

Yoshinobu SATO⁽¹⁾, Tomoki IZUMI⁽¹⁾, Daisuke NOHARA⁽²⁾, Takahiro SAYAMA and Tetsuya SUMI

(1) 愛媛大学大学院農学研究科

(2) 鹿島建設株式会社技術研究所

(1) Graduate School of Agriculture, Ehime University

(2) KAJIMA Technical Research Institute

Synopsis

The objective of this study is to evaluate the risk of floods by modeling rainfall patterns during recent disaster events and applying them to various river basins with different basin geography using a distributed hydrological model. As the first attempt, we tried to change the incoming rainfall patterns by rotate its directions from 90 degrees to 270 degrees from the original rainfall direction. Then, we detected the worst cases of flood hazards considering rainfall patterns and basin geography in several major river basins in Japan. As the second attempt, the relationship between specific river flow and basin shape, gradient, and channel density of the 109 class-A river systems in Japan was investigated. As a result, a weak correlation was found between the specific peak flow and the designed high-water flow with the basin shape, but no clear relationship was found with the annual average flow. Furthermore, it was found that the larger the slope of the basin, the larger the flow rate. However, no clear relationship was found between the water density and the specific flow rate.

キーワード: 流域地形, 降雨パターン, 洪水発生ポテンシャル, 分布型流出モデル

Keywords: Basin Geography, Rainfall Pattern, Flood Potential, distributed hydrological model

1. はじめに

近年、流域の計画規模を超過するような豪雨災害が各地で頻発している。いずれの豪雨災害においても、流域の治水施設の能力を上回る規模の出水が生じ、甚大な洪水被害が生じている。特に平成30年の西日本豪雨災害では、周辺の流域で同等の規模の降

雨があったにも関わらず、肱川流域で特に甚大な洪水災害が発生しており、洪水発生に対する流域条件の影響を改めて分析する必要性が示された。例えば、線状降水帯や前線による降雨では、流域内への降雨域の分布や移動方向によっては、流出水が集中し、中・下流地点での河川流量が著しく大きくなり、大規模な氾濫につながる可能性がある。こうした潜在

的に起こり得るがいわば未発生の洪水災害の可能性を、いかに想定し事前に対策を考えるかが、将来の破局的な洪水被害を回避する上で重要であると考えられる。本研究では、このような視点のもと、我が国の主要な河川流域における洪水発生ポテンシャルを評価するため、洪水発生の要因として、気象条件と流域条件に着目し、気象条件としては降雨の規模と時空間パターンを、流域条件としては流域地形(流域形状・起伏量・水系頻度)を考えながら、洪水発生ポテンシャルとの関係を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

はじめに、愛媛県の肱川流域、岡山県の高梁川流域および京都府の淀川水系桂川流域を対象に流出解析を実施した。降雨の時空間パターンとして平成30年7月の西日本豪雨時における実際の降雨パターンを対象にし、流域の中心(重心)を基準にして降雨域を回転させ、それに伴う基準地点における流出特性(ピーク流量やハイドログラフの形状)を調べた。流出解析には、降雨の時空間分布の影響を反映させるため、分布型流出モデルを用い、肱川と桂川流域はHydro-BEAM(Kojiri, 2010)、高梁川流域ではRRIモデル(Sayama et al., 2012)を用いて解析を行った。入力降雨データには、空間解像度1kmの気象庁の解析雨量データを用いた。降雨パターンは各流域の中心(重心)を基準にして、式(1)を用いて実績降雨域の空間分布を反時計回りに $90^\circ \sim 270^\circ$ の範囲で 90° ずつ回転させたものを用いた。Fig. 1は肱川流域の降雨域を回転させた例(積算降雨量)を示している。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 (x, y) は移動前の経度と緯度、 (X, Y) は移動後の経度と緯度であり、 θ は回転角(rad)である。

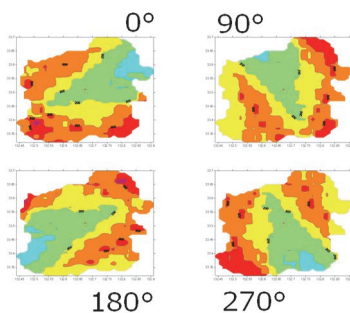


Fig. 1 Sample of rainfall pattern. (Original pattern is 0° and others are rotated counterclockwise around the center of the basin.)

流域形状については、流域形状比と起伏量比、水系頻度を指標として用いた。流域形状比は、流域の最大辺長(km)の2乗を流域面積で除した値(無次元)で、1.0に近いほど正方形(放射状流域)に近く、1.0より大きいほど細長い長方形(羽状流域)となる。起伏量比は、流域の最高標高から河口までの高低差(m)に対する幹川流路延長(km)の比で、値が大きいほど本川の河川勾配が大きい。水系頻度は、河川数に対する流域面積の比で、値が大きいほど河川密度が大きくなる。ここでは、全国109一級水系を対象に上記3つの流域形状指標を抽出し、それらと、各水系河口地点でのピーク流量(各流域全体に均一な同一量の降雨を与えた場合)、基準地点における計画高水流量、および平均流量をHydro-BEAMを用いて流域面積(計画高水については基準地点上流域の面積)あたりの比流量に換算した値にして比較した。

3. 降雨パターンと流域地形の類型化

3.1 降雨パターンの影響1(肱川流域)

Fig. 2は、降雨域を回転させた場合の、西日本豪雨時における肱川流域の降雨分布(積算降雨量)と流域平均雨量を示している。実際の実績降雨(0°)に対し、反時計回りに雨域を 90° 回転させた場合に流域平均雨量は最大(413.49mm)となり、 180° 回転させた場合に最小(394.89mm)となった。

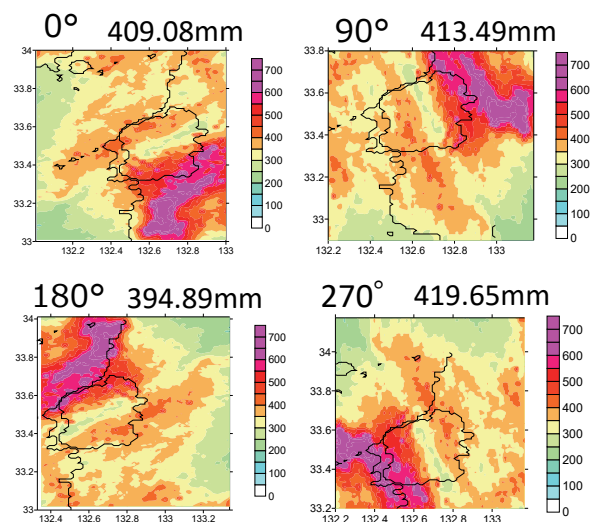


Fig. 2 Spatial distribution of rainfall area and average precipitation of the Hiji River basin

Fig. 3は、肱川大洲地点における河川流量(モデルによる計算値)と上流域平均の降雨量の時間変化を示している。肱川流域の場合、基準地点の大洲におけるピーク流量は、実績の南東側に雨量が集中した降雨パターンの場合よりも降雨域が 90° 反時計回り

にずれて、流域の北西側に雨量が集中した場合のほうが、ピーク流量の値が大きくなり、西日本豪雨時の実績降雨パターンよりも洪水被害が大きくなる降雨パターンが生じる可能性があることが示唆された。ただし、このシミュレーションでは、上流域のダムによる洪水調節や破堤越水による影響は考慮していないので、計算結果の値そのものは実際とは異なることに留意しておく必要がある。

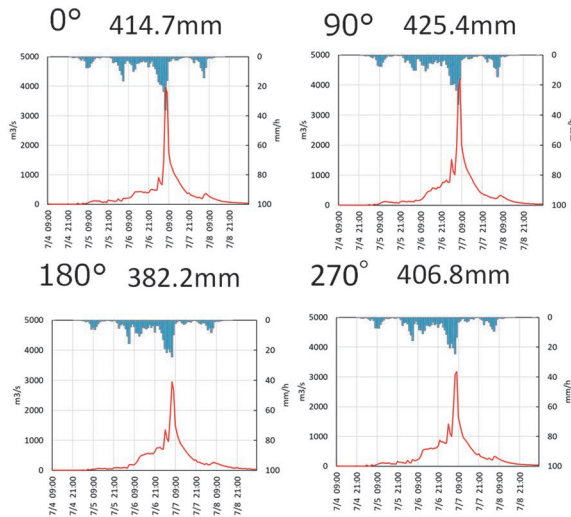


Fig. 3 Hyetograph and Hydrograph at Oozu point of the Hiji River basin.

Fig. 4は、Fig. 3で示した基準地点（大洲地点）の流量(赤線)と、肱川本川に流入する主要な支川流量のハイドログラフを示している。ここでは肱川全体の流域面積(1210km²)の約83%を占める集水面積を持つ大洲地点のピーク流量に対し、肱川南部の本川上流域の野村ダム上流域(168km²)、野村ダムの下流で南西から鹿野川ダム上流に流れ込む黒瀬川(141km²)、鹿野川ダム直下で北東側から流れ込む河辺川(64km²)および大洲上流で北側から合流する小田川(418km²)の流量に着目することにした。その結果、大洲地点流量への影響としては、西日本豪雨時の実績降雨パターンの場合では、流域の南～南西側に位置する野村ダム（本川）と黒瀬川の寄与率が68%と高かった一方、雨域が東～北側に集中する（回転角90～180°）場合は、北東側の流域面積が大きい小田川の寄与率が53～61%を占め、雨域の分布によって、基準地点における洪水（ピーク流量）に対する各支川の影響（寄与率）は大きく異なり、本川上に設置された洪水調節用のダムだけでは十分な治水効果が得られない可能性があることが示唆された。近年、温暖化に伴う気候変動の影響で、これまでにないような極端な豪雨災害が各地で頻発しており、既

往最大事例に相当する降雨の時空間パターンだけではなく、これまでに一度も発生していないようなパターンにおいても、流域内のどこでどのような洪水が発生しうるのかをあらかじめシミュレーションにより想定しておくことは、今後の治水計画を検討する上でも重要であると考えられる。

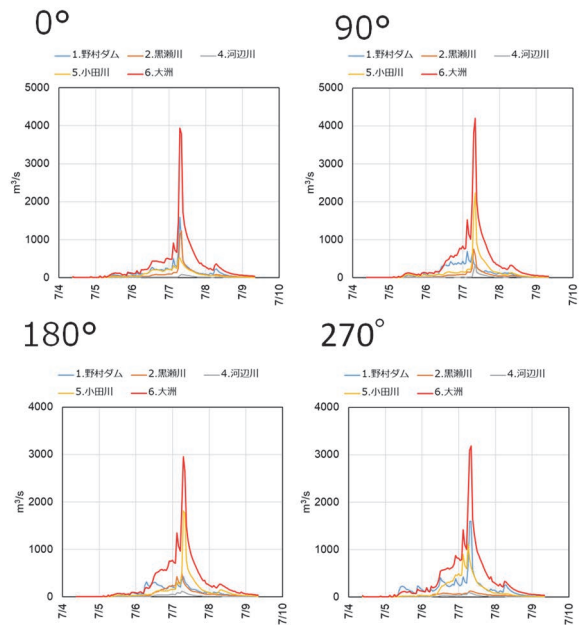


Fig. 4 Difference of river discharge of each tributary in the Hiji River basin.

3.2 降雨パターンの影響2（桂川流域）

Fig. 5は、降雨域を回転させた場合の、西日本豪雨時における桂川流域の降雨分布（積算降雨量）と流域平均雨量を示している。

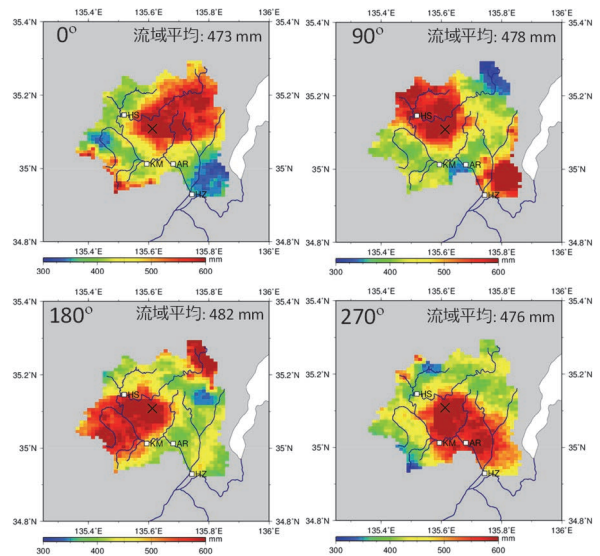


Fig. 5 Spatial distribution of rainfall area and average precipitation of the Katsura River basin

西日本豪雨時の実績降雨473mmに対し、反時計回りに雨域を90°ずつ回転させた場合の流域平均雨量は476~482mmとなり、大きな違いはみられなかった。これは、雨量の多い範囲が回転によって大きく変化しないことと、流域の形状が概ね円状であるためと考えられる。

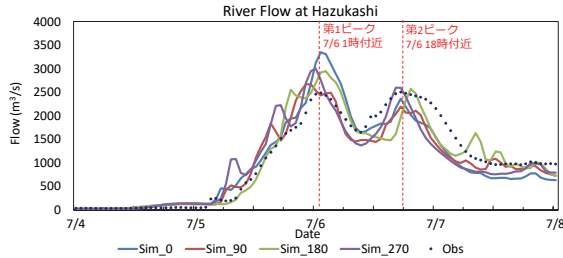


Fig. 6 Hydrograph at Hazukashi point of the Katsura River basin

Fig. 6は、桂川流域末端の基準地点（羽束師地点）におけるハイドログラフを示している。点線で示される実測流量に対し青線が計算流量（実績降雨パターンを入力してHydro-BEAMで計算した流量）を示しており、第1ピーク流量がやや過大評価となっているが、第2ピークを含めて、ピーク流量発生タイミングは概ね実測値と一致している。ピーク流量の値が実測流量と完全に一致しないのは、肱川の場合と同様に上流域のダムによる洪水調節や越水氾濫による影響が反映されていないためであると考えられる。

桂川流域の場合は、第1ピークの流量は、0°のケースで最も大きくなったことから、桂川流域にとっては、実績の降雨パターンが最悪シナリオに近いものだったと考えられるが、180°や270°に回転させると、第2ピークが大きくなっていく傾向がみられたことから、流域内のどこに雨域が集中するかによって、下流地点のハイドログラフの形状が大きく変わることがわかった。

3.3 降雨パターンの影響3（高梁川流域）

Fig. 7は、降雨域を回転させた場合の、西日本豪雨時における高梁川流域の降雨分布（積算降雨量）を示している。降り始め（2018/7/5）からの流域平均の積算雨量は約350mmとなり、雨域を回転させてもその値はほとんど変化しなかった。これも、桂川流域と同様に、高梁川流域が円状に近い形状をしていたためであると考えられた。

Fig. 8は、高梁川流域平均降水量の時間変化（上段図）とRRIモデルによって計算された河口地点でのハイドログラフ（下段図）を示している。流域平均降雨強度の時間変化は雨域の回転でほとんど変化しな

いが、ピーク流量は180°回転させると2山のピークが1山となっており、上流側と下流側のどちらにも雨域が集中するかによって洪水ピークの発生パターンが変化することがわかった。

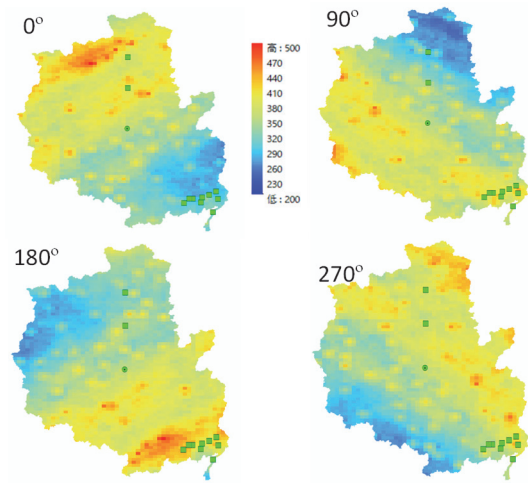


Fig. 7 Spatial distribution of rainfall area and average precipitation of the Takahashi River basin

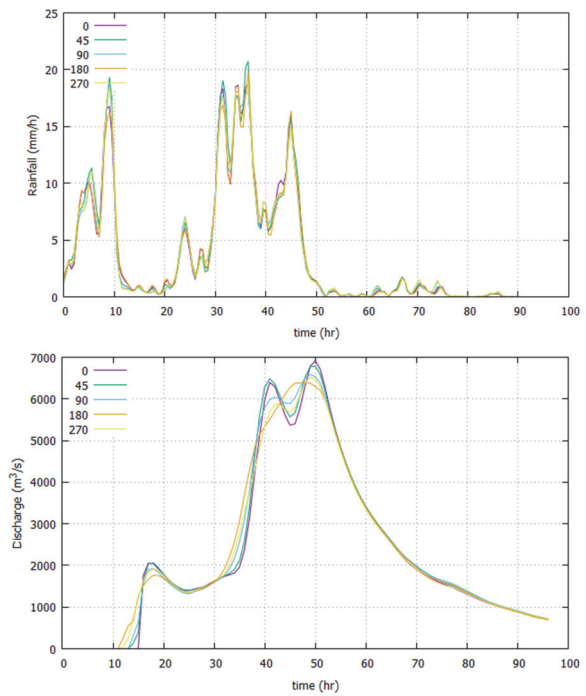


Fig. 8 Hyetograph (Upper) and Hydrograph (Lower) at river mouth of the Takahashi River basin.

3.4 流域地形の類型化1（形状比）

Fig. 9は全国109一級水系の流域形状比を示している。一般に、流域形状比は、流域最大辺長Lの2乗を流域面積Aで除した値で求められる（山下ら, 2019）が、ここでは、洪水発生ポテンシャルに着目するため、流域最大辺長のかわりに幹川流路延長の値を用

いることにした。

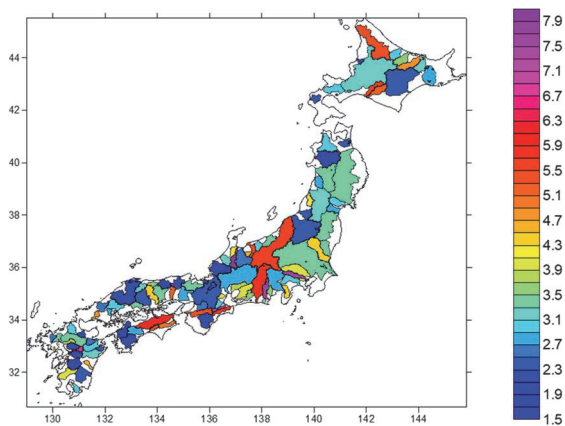


Fig. 9 Basin shape ratio of the 109 class-A River basin.

流域形状比でみると、庄川(7.97)、多摩川(7.59)、大井川(7.51)などが高い値を示したが、信濃川や天竜川、吉野川、天塩川なども5.0を超える形状比を示し、細長い流域(羽状流域)であることがわかる。一方、3.1~3.3で解析対象とした、肱川や淀川(桂川)、高梁川などは青色(形状比3.0以下)で示されており、丸い形状の流域(放射状流域)であることがわかる。

3.5 流域地形の類型化2(起伏量比)

Fig. 10は全国109一級水系の起伏量比を示している。起伏量比は、流域の最高標高(H_{max})から河口(H_{min})までの高低差(m)に対する幹川流路延長(km)の比で、値が大きいほど本川の河川勾配が大きいことを示している。

起伏量比が大きいのは、狩野川(48.6)、常願寺川(48.3)、姫川(46.1)など、富士山の南側や北アルプスの北側に位置する流域で、比較的流域面積の小さい流域であった。これは、流域面積が大きいと幹川流路延長が長くなるため、結果として、石狩川や利根

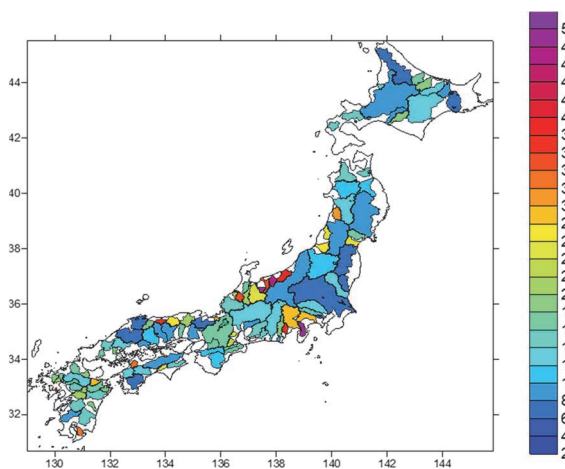


Fig. 10 Basin relief ratio of the 109 class-A River basin.

川、信濃川などの起伏量比の値が小さくなったものと思われる。

3.6 流域地形の類型化3(水系頻度)

Fig. 11は全国109一級水系の水系頻度を示している。水系頻度は、河川数(N)に対する流域面積(A) km^2 の比で、値が大きいほど河川密度が高いことを示している。肱川(0.39)が最も高く、六角川(0.23)や本明川(0.21)など、四国や九州で値の高い流域がみられたが、それ以外のほとんどの流域(約8割)では値が0.1以下で、大きな違いはみられなかった。

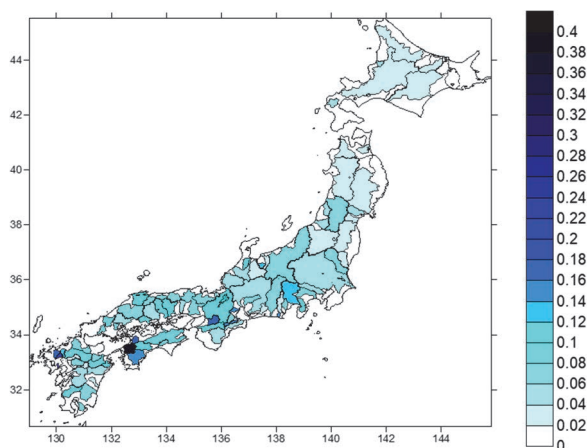


Fig. 11 River density of the 109 class-A River basin.

4. 流域地形と洪水発生ポテンシャル

4.1 洪水発生ポテンシャル1(ピーク流量)

Fig. 12はHydro-BEAMで計算した全国109一級水系の河口地点におけるピーク流量の比流量を示している。ここでは、蒸発散を無視し、降雨継続時間72時間(3日間)で流域平均総降雨量200mmを中央集中型ですべての流域内に均一(空間分布無し)で与え、モデルパラメータ(有効土層厚や透水係数、流出係数など)もすべて同じ値とした。ただし、土地利用(森林・草地・水田・都市・水域)による粗度係数や勾配(斜面・河道)は、流域ごとに国土数値情報と50mの数値標高データに基づいて1kmメッシュ単位で設定した。したがって、全国の流域に同じ条件で雨を与えた時に、同じパラメータ設定の降雨流出モデルを稼働させた場合に、流域地形(河道網・河道長・斜面勾配・河道勾配)によって、洪水ポテンシャル(ピーク流量)にどのような違いがでるのかを調べることを目的としており、流域ごとに実測流量と合うように調整したパラメータを用いていないことに留意する必要がある。つまり、実際(現実)の各流域の特定条件の洪水時におけるピーク流量の

比流量値を反映しているわけではない。また、単位面積あたりの比流量で比較するのは、ピーク流量の値そのものを用いると、流域面積に比例してピーク流量が大きくなってしまうためである。

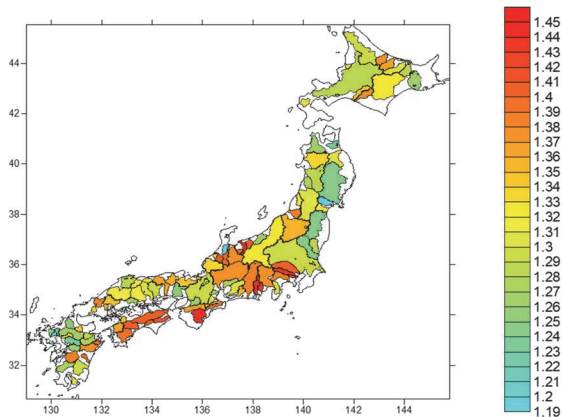


Fig. 12 Specific peak discharge ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) of the 109 class-A River basin.

全国の一級水系に同じ条件の雨を降らせた場合に、洪水（単位面積あたりで大きなピーク流量）が発生しやすい流域が、ピーク比流量の高い流域であり、新宮川(1.448)、黒部川(1.447)、大井川(1.444)、安部川(1.433)、多摩川(1.432)などが高い値を示し、その他にも中央構造線に沿った細長い流域でピーク比流量の値が高い傾向があることがわかった。

4.2 洪水発生ポテンシャル2（計画高水流量）

Fig. 13は全国109一級水系の各基準地点における計画高水を比流量に換算した値を示している。計画高水流量と基準地点上流域の面積については、河川便覧2002（日本河川協会、2002）および日本河川図(http://www.japanriver.or.jp/river_law/map.htm)の値を用いた。なお最新の情報は、河川データブック2021(国土交通省、2021)にあるが、ここでは、少し古

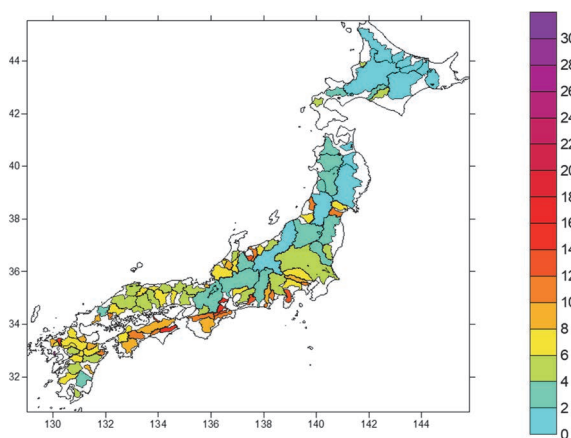


Fig. 13 Design flood per unit area ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) of the 109 class-A River basin.

い情報に基づいた解析結果となっているため、近年、治水計画の基準が見直された流域では、現状と値が異なっている可能性がある。

計画高水流量は、実際の洪水災害の既往最大や確率雨量に基づいて設定されているため、各流域での過去の洪水履歴から直接的に推定される最大クラスの洪水に相当すると考えられるが、比流量に換算して分布をみると、本州の太平洋側や紀伊半島・四国地方にある比較的細長い流域で高い値を示しており、主に台風起因する洪水が発生しやすい流域に対応していると考えられる。

4.3 洪水発生ポテンシャル3（年平均流量）

Fig. 14は全国109一級水系の各基準地点における年平均流量を比流量に換算した値を示している。年平均流量の値も、河川便覧2002および日本河川図の値を用いているので、最新の情報には基づいていないが、年平均流量（多年平均値）は、気候の変動や人間活動（水利用）、または土地利用が劇的に変化しない限り、数年～数十年の時間スケールで大きく変動することはないと考えられる。

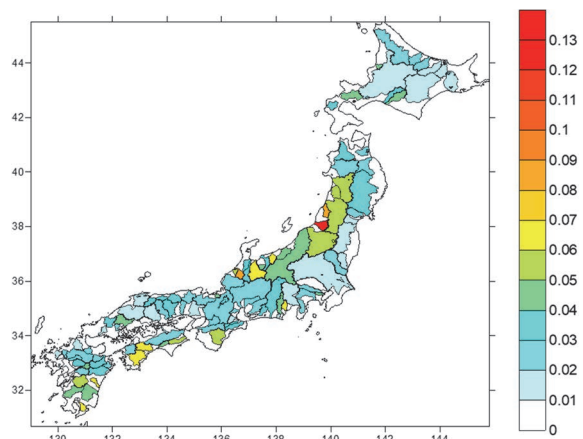


Fig. 14 Annual average discharge per unit area ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) of the 109 class-A River basin.

年平均流量（多年平均値）は、流域ごとに異なる水管理や水利用の実態を反映していると考えられるため、流域の地形量（形状や起伏等）とは、明確な関連性はみられなかった。

4.4 流域地形と比流量の関係

Fig. 15は、流域地形と洪水発生ポテンシャル（比流量）の関係を示している。流域形状（上段図）については、ピーク比流量と計画高水流量に対して有意な正の相関がみられた。このことは、細長い形状の羽状流域の方が、円状（放射状）の流域よりも洪水発生ポテンシャルが高いことを示唆している。



Fig. 15 Relationship between basin topography (Upper: Basin shape ratio, Middle: Basin relief ratio, Lower: River density) and flood potential (Left: Specific peak discharge, Center: Design flood per unit area, Right: Annual average discharge per unit area).

5. おわりに

年平均流量は流域の形状との有意な相関は認められなかった。起伏量（中段図）については、ピーク流量、計画高水流量、年平均流量すべてに対し、有意な正の相関が認められた。このことから、幹川流路の勾配が急な流域ほど、洪水発生ポテンシャルが高くなると考えられる。水系頻度（下段図）については、計画高水流量に対しては有意な正の相関、年平均流量については有意な負の相関がみられたが、ピーク流量との相関は認められず、水系頻度（河川密度）と、洪水発生ポテンシャルとの関係性はみられないと考えられた。

本研究では、流域地形と降雨の時空間パターンの組み合わせを考慮した洪水発生ポテンシャルの評価を目的として、雨域を回転させた場合（降雨の空間分布）の影響と、地形（流域形状比・起伏量比・水系頻度）の影響について検討を行った。その結果、基準地点におけるピーク流量が雨域分布のパターンによって変化し、肱川では、実績降雨パターンよりも、ピーク流量がより大きくなる降雨パターンがあり、桂川ではピークが複数に分散するような場合はピーク流量が抑えられ、高梁川では下流側に雨域が集中する場合に、ハイドログラフの形状が他の降雨

パターンとは異なることが明らかとなった。また、全国109一級水系を対象にし、流域形状を表す指標として、流域形状比と起伏量比を用いて、河口地点でのピーク流量（各流域全体に均一な同一量の降雨を与えた場合）と基準地点における計画高水流量を、流域面積（計画高水については基準地点上流域の面積）あたりの比流量に換算した値とを比較した。その結果、ピーク流量と計画高水流量は、流域形状に対し有意な正の相関があり、細長い流域（羽状流域）の方が大きな洪水が発生しやすいことがわかった。この結果は、末次（2015）による「 A/L^2 の小さな羽状（細長い）流域では Q/A （比流量）が大きい」という結果とは一致するが、池淵ら（2006）による、「羽状流域では、支川の洪水時刻が少しずつずれるため、本川のピーク洪水流量は緩和される傾向にある」という結果とは異なっている。これは、本来、羽状流域や放射状流域という区分は、本川に対し、支川がどのように合流するかによる分類であり、単純に流域の形状（外形）のみで分類した本研究の結果とは完全に一致するわけではないためであると考えられる。つまり、本研究で流域形状比の値が大きい（羽状流域）とした流域の中にも、厳密には放射状流域や平行流域に分類される流域が含まれている可能性がある。したがって、今後は、本川に対する支川の合流のしかた（河道網構造）に着目した分類に基づく解析も必要と考えられる。計画高水流量と流域地形との相関についても、厳密には基準地点上流域の形状との関係性を調べるべきであると考えられる。起伏量比（勾配）に関しては、ピーク流量・計画高水流量ともに有意な正の相関があり、勾配の急な流域ほど、洪水のリスクが大きいことがわかった。今後は、これらの結果と雨域の移動方向を組み合わせ、最新の情報の基づいたより詳細な全国109一級水系における洪水発生ポテンシャルの評価を行っていく

必要がある。

謝 辞

本研究は、令和元年度京都大学防災研究所共同研究（一般共同研究2019G-02）からの支援を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 池淵周一・椎葉充晴・宝馨・立川康人(2006)：エース水文学，朝倉書店，201pp.
- 国土交通省(2021)：河川データブック2021，https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen_db/index.html
- 末次忠司(2015)：実務に役立つ総合河川学入門，鹿島出版社，134pp
- 日本河川協会（2002）：河川便覧2002，国土開発調査会，423pp.
- 山下亜紀郎・岩井優祈・川添航・佐藤壮太・鈴木修斗(2019)：日本の一級水系109流域の形状比と起伏量比，人文地理学研究，第39巻，pp.19-26.
- Kojiri, T. (2010): Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM), In: Singh.V.P. and Frevent, D.K. (eds). Watershed Models, Taylor & Francis, CRC Press, pp.613-626.
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K. (2012): Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, Vol. 57, No. 2, pp. 298-312.

（論文受理日：2021年8月31日）