

地先のハザードカーブに基づいた流域の 地理的構造化とその自然的・社会的要因の分析

ANALYSIS OF GEOSPATIAL STRUCTURE OF HAZARD BASED ON
LOCAL HAZARD CURVES AND ITS NATURAL AND SOCIAL FACTORS

山田真史¹・知花武佳²・渡部哲史³

Masafumi YAMADA, Takeyoshi CHIBANA and Satoshi WATANABE

¹正会員 工博 京都大学防災研究所 JSPS特別研究員PD (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 特任講師 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Hazard Curve (HC) represents the probabilistic hazard of each point, by describing the relation between exceedance probability and maximum inundation depth. In this study, we investigated the geospatial structure of point-based and probabilistic hazard through ensemble flood simulation using d4PDF and RRI model, and HC clustering analysis in Yoshino river basin, Japan. As a result, we demonstrated that valley bottom sections and meandering sections have contrasting structure: in valley-bottom plain section, probabilistic hazard characteristics change from upstream to downstream, but in meandering plain section, probabilistic hazard characteristics change depending on the proximity to the river channels. By comparing these structures with geological maps and natural landforms, we also discussed the natural and social factors of these geospatial hazard structures.

Key Words: Hazard Curve, Probabilistic Hazard Analysis, Geospatial Hazard Structure, Ensemble Flood Simulation, d4PDF, RRI model

1. 序論

(1) 背景

気候変動により将来的な災害外力の強大化が想定される一方、人口減少と高齢化に伴う公共事業財源の不足もまた懸念されており、治水対策を水害リスクの観点から検討することは重要な課題である。歴史的に行われてきた堤防整備等のハード面対策に加えて、土地利用規制や水害保険等のソフト面対策を組み合わせ、効果的な治水対策を構築するためには、各地先におけるリスク・ハザード情報を考慮することが必要となる^{1,2)}。リスクとハザードの関係性は図-1のように表され³⁾、リスクがハザード・暴露 (Exposure) ・脆弱性 (Vulnerability) から構成される複合的な概念である一方、ハザードは災害外力規模に対応する要素である。治水対策においては、洪水流・氾濫水によって生じる直接的な事象である浸水深をハザードとし、ある特定の災害外力規模に対する想定最大浸水深の空間分布を示したハザードマップが広く公表されている⁴⁾。しかしながら、ハザードマップは特定

の災害外力規模に関する検討にとどまり、様々な災害外力規模に対する最大浸水深の変化という地先の確率的ハザード情報については検討・表現をしていない。洪水のハザード情報に着目した既往研究として、大林ら⁵⁾は石狩川流域を対象とした実際のハザードマップの収集・検討からその現状・課題を分析し、想定最大浸水深の分布に加えて地形毎の洪水特性を考慮する必要性を指摘している。また、多田⁶⁾は現行のハザードマップ作成手法において破堤地点の不確実性および破堤規模の不確実性が考慮されていない点に着目し、ハイドログラフを固定して破堤地点・規模を変化させた氾濫解析を組み合わせることで、各地先での浸水確率を考慮した浸水リスクマップを提案している。これらは現在のハザードマップの改良を試みるものである一方で、対象とする災害外力規模は固定されており、本研究が指摘する、様々な外力規模の発生確率と浸水深の関係としての確率的側面には着目していない。

各地先における確率的ハザードは、それぞれの地先における浸水深 (横軸) と年超過確率 (縦軸) の曲線である水害ハザードカーブとして表すことができ、各地先の



図-1：リスクを構成するハザード・暴露・脆弱性の関係 (Holtz et al.³⁾を筆者編集)

水害ハザードカーブから、それぞれの地点での確率的ハザードの特徴を考察できる。各地先での土地・家屋の所有者がその地先の確率的ハザード特徴に基づいて土地利用の選択や自助的な浸水対策を行うことは、河川管理者の計画に依らない水害対策の一つとなると考えられるが、現在まで地先の水害ハザードカーブの提供は試みられていない。さらに、横軸を被害額とするリスクカーブは各地先のカーブを統合することで領域のカーブを算出するアップスケールが可能である一方で、ハザードカーブは同様のアップスケールを行うことができないという難点があり、流域全体を計画の対象とする河川管理者の治水計画においては、各地先の確率的ハザード情報の活用は未だ図られていない。

(2) 目的

本研究は、地先の確率的ハザード情報の活用方法の例示を、以下の三つの段階から試みる。第一に、吉野川水系中流部右岸域を対象領域とし、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース：database for Policy Decision making for Future climate change(d4PDF)」⁷⁾の雨量データを用いた30mメッシュの高解像度氾濫解析を多数の仮想年について行うことにより、各地先の確率的ハザードを水害ハザードカーブとして算出する。第二に、各地先のハザードカーブ群をクラスタリング分析により類型化し、流域空間を構造化することで、確率的ハザードの地理的構造を明らかにする。第三に、確率的ハザードの地理的構造に対して影響を与える自然的・社会的要因について検討する。

2. 手法・計算

(1) 対象領域の概要

吉野川流域は四国四県に跨り、本川延長194km、流域面積3,750km²の一級水系であり、東西に細長い流域形状を特徴とする。流域は山間溪谷部（源流から池田）、段



図-2：地先のハザードカーブ群の計算対象領域

丘面に挟まれた狭隘な谷底平野部（池田から岩津）、支川扇状地より影響を受ける幅広の谷底平野部（岩津から川島）、発達した蛇行原およびデルタ部（川島から河口）に区分される。本研究では、図-2に示した、岩津狭窄部から右支川である鮎喰川合流点間の本川右岸領域（赤枠内）を、流出氾濫解析による地先のハザードカーブ群の計算対象領域として設定する。計算対象領域の境界は堤防もしくは分水嶺である。

(2) d4PDFに基づく降雨データの概要

各地先における水害ハザードカーブを算出するためには、多数の降雨パターンに基づいて流出氾濫解析を行い、それぞれのメッシュセルにおける浸水深と年超過確率の関係を求める必要がある。

本研究ではまず、d4PDFによる20kmメッシュ解像度の過去再現降雨データから、渡部ら⁸⁾の手法により、アメダス観測点を対象としたバイアス補正降雨量データセットを、1メンバ30年間で50アンサンブル、合計1500仮想年分を作成した。時間解像度は1時間である。続いて、5時間以上の無降雨を区切りとして、各仮想年を単位降雨事象に切り分けた。その後、計算対象領域の計画降雨継続時間の候補として3時間・6時間・12時間・24時間・48時間の5種類を設定し、各仮想年について、各計画降雨継続時間に関する年最大降雨量を計算対象領域にもたらす時間帯を決定し、その時間帯と重なる降雨事象を解析対象として抽出した。なお、時間帯に1つの単位降雨事象のみが重複する場合はその単位降雨事象を解析対象として抽出したが、複数の単位降雨事象が重なる場合は、それらを結合して1つの降雨事象と見なし、解析対象として抽出した。以上の手順により、各仮想年から最低1つ、1,500仮想年で合計2,574の降雨事象を解析対象として選択した。

(3) RRIモデルによる流出氾濫解析

a) RRIモデルの概要

本研究では多数の降雨事象を入力として流出氾濫解析を行うことから、佐山ら⁹⁾により開発された降雨流出氾濫一体解析モデルRRI(Rainfall-Runoff-Inundation Model)を用いる。RRIモデルの概念図を図-3に示す。RRIモデルは拡散波近似した浅水方程式を斜面・河道の双方の基礎

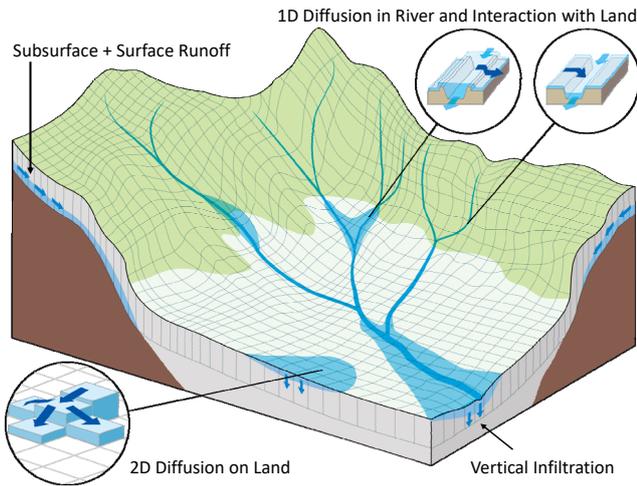


図-3：RRIモデルの概念図¹⁰⁾

表-1：河道断面形状のパラメタ

	c_w	s_w	c_d	s_d
流出解析	1.7	0.7	1.4	0.3
氾濫解析	7.0	0.65	1	0.3

表-2：ダム諸元

ダム名	池田	早明浦	豊郷	柳瀬	新宮
洪水調節容量(m ³)	4400000	90000000	12500000	7600000	5000000
計画放流量(m ³ /s)	11000	2000	900	1400	1200

表-3：計算に用いたパラメタ

パラメータ	山地部	平野部
河道粗度係数 n_r [m ^{-1/3} s]	0.055	
斜面粗度係数 n_s [m ^{-1/3} s]	0.3	0.3
土壌厚 d [m]	0.4	0.4
浸透係数 k_a [m/s]	0.125	
鉛直浸透係数 k_v [m/s]		5.56×10^{-7}

式として用いるため、二次元不定流に基づく氾濫解析モデルに比べて軽量であり、解析試行数が多い本研究に適切である。また、図-2に示した計算対象領域内には、無堤の小支川が複数流れており、これらの河川からの外水氾濫と内水氾濫の厳密な区別が難しく、河道と氾濫原の間には双方向の水のやり取りが想定される。RRIモデルは外水と内水を区別せず一体に解析が可能であり、また河道・氾濫原間の双方向の水のやり取りを考慮するため、実際の物理的現象をより適切に再現できると考えられる。なお、RRIモデルの詳細はRRI Manual¹¹⁾を参照されたい。

b) 使用データ・計算条件

地盤データとして、計算対象領域のり流出氾濫解析には、山崎ら¹²⁾によって作成された日本全域の30mメッシュ表面流向データ・累積流量データおよびDEMデータを用いた。なお、計算対象領域の境界を越える地表流水のやりとりを生じさせないため、計算対象領域の計算対象領域の境界部セルの地盤高が隣接する領域内側セルの地盤高と比して小さくなることのないように、航空写真等を参照して地盤高の補正を行った。一方で、境界条件設定のための流域全体での流出計算では、基盤地図情報5mメッシュ標高・10mメッシュ標高をもとに、300mメッシュへアップスケールしたDEMを作成し、ArcGIS

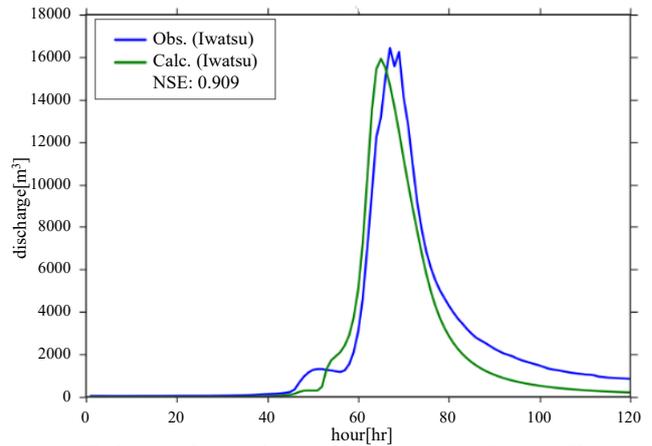


図-4：2004年10月台風23号出水での岩津地点の流量

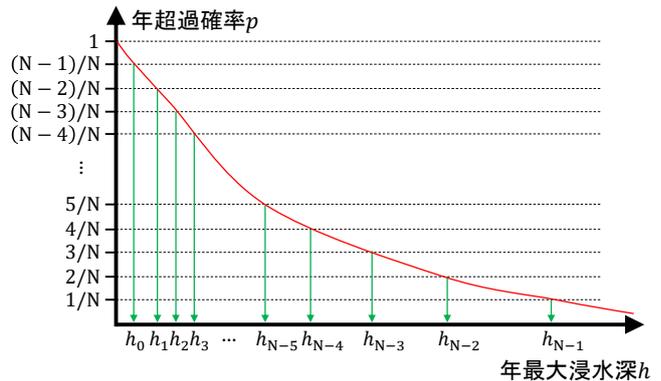


図-5：ハザードカーブのN次元離散化の概念図

を用いて表面流向データ・累積流量データを作成した。

RRIモデルでは、斜面勾配が大きい山地部において不飽和側方浸透流と表面流を一体的に考慮する流出機構と、斜面勾配が小さい平野部において鉛直浸透を考慮する流出機構のどちらかを、メッシュごとに割り当てることができる。本研究では、国土数値情報土地利用細分メッシュデータ平成18年度版において土地利用区分が森林となっている領域を山地部とみなして前者の流出機構を適用し、一方で森林以外の土地利用区分の領域を平野部とみなして後者の流出機構を適用した。なお、1つの流出氾濫解析メッシュに複数の土地利用が含まれる場合、最も面積割合が大きい土地利用を、その流出氾濫解析メッシュの土地利用区分とみなした。

河道断面形状は矩形断面とし、幅は式(1a)、深さは式(1b)に基づき、断面形データが存在する地点との比較から決定した。表-1に決定したパラメタを示す。なお、 A は各河道セルの集水面積(km²)である。

$$width = c_w A^{s_w} \quad (1a)$$

$$depth = c_d A^{s_d} \quad (1b)$$

計算対象領域の北側境界は吉野川本川堤防であり、地表流水が領域外へ出ていかないように地盤高を調節している。一方で、本川へと合流する各支川は、実際には堤防を水門で通過する。支川から本川への流出を表現するためには、水門の開閉を考慮する必要がある。そこで本研究では、解析対象の各降雨事象について、流域全体で



図-6：計算対象領域のハザードカーブのクラスタリング結果（クラスタ数5の例）

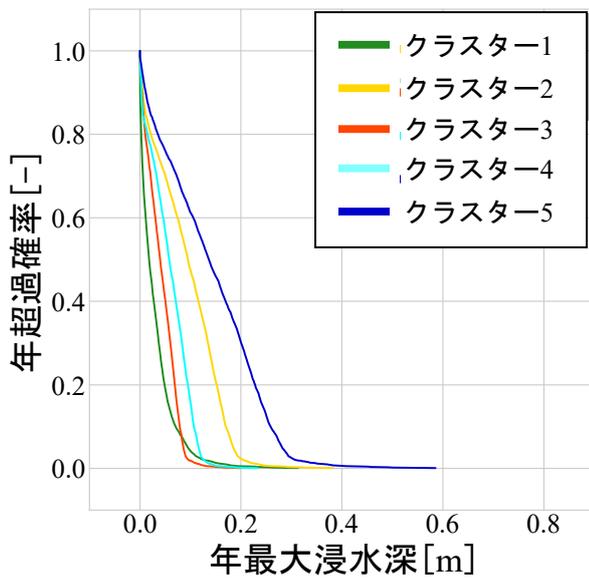


図-7：各クラスタの平均ハザードカーブ

の流出計算から本川・支川合流部の本川側水位をあらかじめ算出しておき、本川側水位が合流点支川側の河床高を上回る時間については、支川から本川への合流流量を0とすることで、水門の閉鎖を再現した。また、流域全体での流出計算では、吉野川水系上流部に存在するダム群を考慮する必要がある。本研究では、表-2に示す各ダムの実際の洪水調節容量・計画放水量を用いた単純一定量方式でダムによる効果を再現した。これらの条件をもとに、表-3に示すパラメータを、2004年10月の台風23号による出水での池田地点・岩津地点での流量ヒドログラフ、および計算対象領域での浸水域の整合性から決定した。岩津地点のヒドログラフを図-4に示す。ヒドログラフ形状の特徴を再現できており、またNSE指標も0.9以上と十分高いことが読み取れる。

c) 地先のハザードカーブの算出とクラスタリング

前節で解析対象として抽出した合計2574降雨事象を入力とし、前項で較正したRRIモデルを用いた流出氾濫解析を実施した。続いて、クラスタリングの計算負荷の大

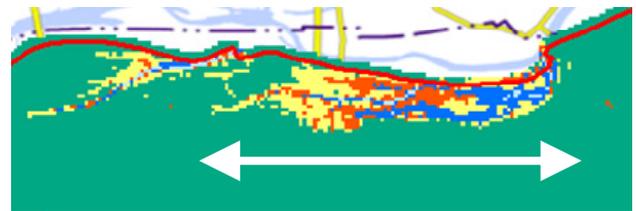


図-8：谷底平野区間の拡大図

きさから、30mメッシュでの各仮想年の年最大浸水深平均値を用いて60mメッシュにアップスケールし、アップスケール後の各メッシュについて、1,500仮想年分の年最大浸水深を整理して年超過確率を求めることで、60mメッシュ解像度での地先のハザードカーブ群を算出した。

各地先の確率的ハザード特徴の類似性に基づいて流域を構造化するためには、各地先のハザードカーブ群をその形状の類似性に基づいて類型化することが必要である。これを目視で検討することは現実的ではないため、本研究では階層的クラスタリングを採用する。図-5は、ハザードカーブのN次元ベクトルへの離散化の概念図である。N次元ベクトル間にはユークリッドノルムが距離関数として定義できるため、Ward法による階層的クラスタリングを行った。なお、曲線の形状を保ちつつ、計算負荷を抑えるため、N=150とした。計算対象領域内の60mメッシュ数は約5.6万である。

図-6は、出力クラスタ数5の場合の分析結果の地図である。また、図-7はこのときの各クラスタの平均ハザードカーブである。

3. 結果・考察

(1) 谷底平野区間で見出された確率的ハザードの地理的構造とその要因に関する考察

谷底平野区間においては、図-8に矢印で示すように、確率的ハザード特性が上流側から下流側に向けて変化する縦軸型の地理的構造が抽出された。この要因として、

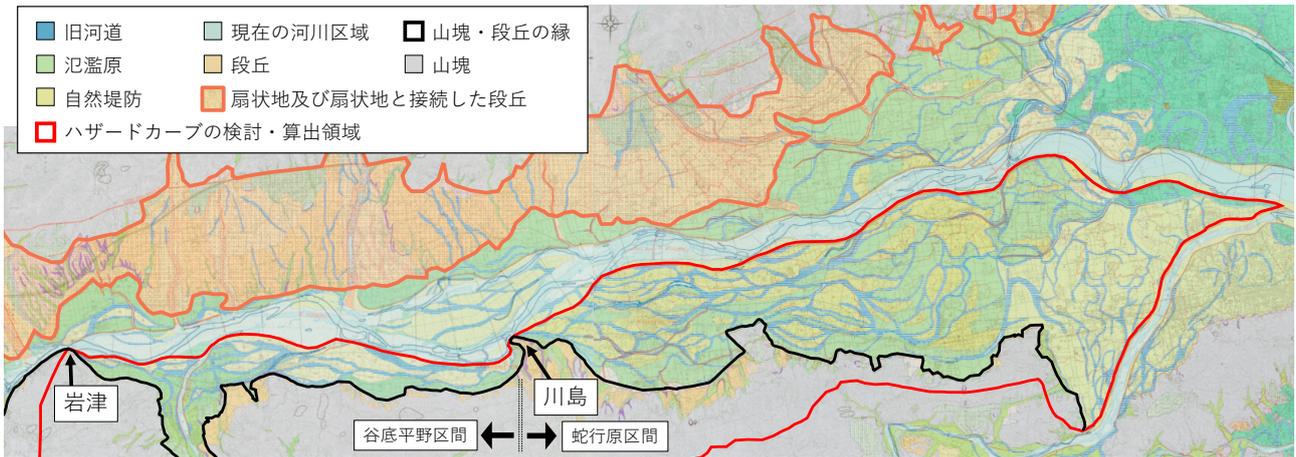


図-9：水害地形分類図（大矢ら¹³⁾に加筆修正）

本川を挟んだ山塊の地質の差異が挙げられる。北岸側の地質は土砂生産が活発な和泉層群である一方、南岸側の地質は土砂生産が低調な三波川変成帯である。この結果、図-9から観察できるように、北岸側でのみ土石流型の支川扇状地が発達して本川を南岸側へと押し付け、谷底平野閉塞部が生じる（例：岩津、川島）。閉塞部直上流で支川の貯留型氾濫による頻繁な湛水区画が生じることが、上下流方向に変化する確率的ハザードの地理的構造の要因と考えられる。

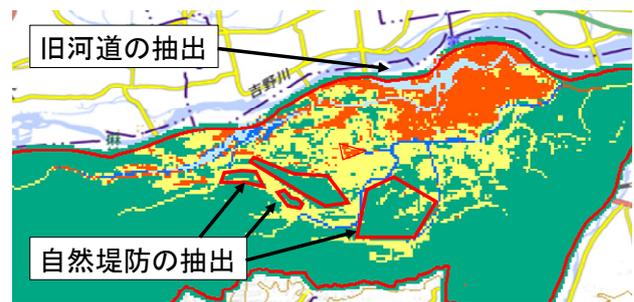


図-10：自然地形分類の抽出

(2) 蛇行原区間で見出された確率的ハザードの地理的構造とその要因に関する考察

蛇行原区間においては、図-6に示すように、確率的ハザード特性が本川・支川からの距離により様々に変化する、横軸型の地理的構造が抽出された。この要因として、蛇行原区間においては、図-9から観察できるように北岸側の扇状地が小さくなり、また谷底平野区間と比べて蛇行原が十分な幅を持ったことで、本川の転流による旧河道網と自然堤防が発達する一方、旧河道・支川沿い低地が帯状の氾濫域となることが挙げられる。さらに社会的要因として、歴史的な治水対策の変遷が指摘できる。江戸期の徳島藩は藍作が主要な産業であり、連作障害を解消するために洪水による客土が必要であったことから、無堤政策による氾濫受容策を敷いていた¹⁴⁾。支川扇状地が存在せず、洪水による客土を広い範囲に得られる本川右岸側は主要な藍農地であったことから、連続堤防化が試みられることはなく、堤防法線も確定しなかった。明治期に入り、連続堤防の築堤が開始されると、洪水客土をもたらしていた小派川の分派点が堤防により封鎖され、堤内地小支川化した。これらの小支川もまた、帯状の氾濫域を河道沿いに持ち、蛇行原区間の横軸型の確率的ハザードの地理的構造の要因となっていると考えられる。

(3) 確率的ハザードの地理的構造と自然地形分類の関係

蛇行原区間の拡大図を図-10に示す。赤線で強調した緑の島状領域は、クラスタ2に囲まれたクラスタ1の領域

である。図-7のクラスタ内平均ハザードカーブの比較から、同じ年超過確率の年最大浸水深は、クラスタ2に比べてクラスタ1が小さい。このクラスタ1の島状領域は自然堤防を抽出しており、周辺の氾濫原に比べて、自然堤防上は浸水深がどのような洪水についても小さいことを示唆している。一方で、図-10右上には、橙色のクラスタ3領域に囲まれた水色のクラスタ4領域が帯状に観察できる。図-7より、同じ年超過確率の年最大浸水深は、クラスタ3に比べてクラスタ4が大きい。このクラスタ3の帯状領域は旧河道を抽出しており、周辺の氾濫原に比べて、旧河道は浸水深がどのような洪水についても大きいことを示唆している。

このように、各クラスタの地理的分布が自然地形分類の差異を抽出している場合が見られた。これら自然地形分類ごとの浸水特性を、特定の災害時の浸水深の差ではなく、確率的ハザードの特徴に基づいて検討した研究は本研究が初めてである。また、定量的な確率的ハザード情報のみに基づいて自然地形分類が抽出できるという知見自体が、流域内部における水害ハザード特性の地理的構造を検討する際に、自然地形分類に着目する重要性を示すものである。

4. 結論

本研究では、アンサンブル気候実験の降雨データを用いた高解像度の氾濫解析を多数の仮想年について行うこ

とにより、各地先の確率的ハザードを水害ハザードカーブとして定量化するとともに、水害ハザードカーブの形状の類似性から各地先の確率的ハザードの類似性を評価・構造化し、確率的ハザードの地理的構造を明らかにした。また、明らかにした確率的ハザードの地理的構造に対して影響を与える要因についても検討を加えた。本研究の結論を以下に述べる。

1. 多数の水害ハザードカーブの類似性を評価し類型化をするために、年超過確率に基づく離散化とクラスタリングが有効であることを示した。

2. 吉野川水系右岸の事例分析から、地先の確率的ハザード特徴に基づく地理的構造について、谷底平野区間は確率的ハザードの類型が上流から下流に向けて変化する縦軸型の地理的構造が見出されたのに対し、蛇行原区間では、確率的ハザード特性が本川・支川からの距離により様々に変化する、横軸型の地理的構造が抽出された。

3. 谷底平野区間、蛇行原区間のそれぞれで見出された固有の地理的構造について、単なる地盤の高低のみならず、流域地質・地形や歴史的な治水事業の経緯が影響を与えていることを指摘し、流域全体の水害ハザードを検討する際にこれらの観点を含める必要性を示した。

4. 自然堤防や旧河道等の自然地形分類が、確率的ハザードのみの検討から抽出されることを示すとともに、確率的ハザードの地理的構造を検討する上で自然地形分類を考慮する必要性を指摘した。

本研究で得られた知見は、地先スケールでの確率的ハザードを検討する際、考慮すべき観点を提示するとともに、現在まで治水計画において考慮されてこなかった地先の確率的ハザード情報の活用を促すものである。

謝辞：本研究にあたり、徳島県県土整備部河川整備課から過去の実績浸水範囲データをご提供いただいた。本研究では、創生プログラムのもとで作成された、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース(d4PDF)を使用した。利用したデータセットは、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。また、図-6、図-8、図-10は、国土地理院の電子地形図を使用したものである。本研究の一部は河川基金2017-5311-004、JSPS科研費JP18J11683、18K13834の助成による。以上記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田中智大, 市川温, 萬和明, 立川康人: 浸水被害確率マップ作成手法の開発と宅地かさ上げによる便益評価への応用. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1477-I_1482, 2018.
- 2) 山田真史: 河川水害リスクの地理的構造の把握とその自然的・社会的要因の解明. 東京大学博士論文, 2019.
- 3) Holtz, D., Markham, A., Cell, K. and Ekwurzel B.: National Landmarks at Risk: How Rising Seas, Floods and Wildfires Are

Threatening the United States' Most Cherished Historic Sites. 2014 report on climate and cultural heritage in the US, Union of Concerned Scientists, 2014.

- 4) 国土交通省: 洪水ハザードマップ作成の手引き(改定版), 2013.
- 5) 大林あずさ, 加賀屋誠一, 鈴木英一, 川村里実: 石狩川流域を対象とした洪水ハザードマップの現状・課題と改善策についての研究. 土木学会論文集F6(安全問題), Vol.68, No.2, pp.I_12-I_17, 2012.
- 6) 多田毅: 浸水確率の空間分布を考慮した浸水リスクマップの提案. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_1339-I_1344, 2016.
- 7) Mizuta, R., Murata, A., Ishii, M., Shiogama, H., Hibino, K., Mori, N., Arakawa, O., Imada, Y., Yoshida, K., Aoyagi, T., Kawase, H., Mori, M., Okada, Y., Shimura, T., Tagatomo, T., Ikeda, M., Endo, H., Nosaka, M., Arai, M., Takahashi, C., Tanaka, K., Takemi, T., Tachikawa, Y., Temur, K., Kamae, Y., Watanabe, M., Sasaki, H., Kitoh, A., Takayabu, I., Nakakita, E. and Kimoto, M.: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.98, No.7, pp.1383-1398, 2017.
- 8) 渡部哲史, 中村みゆき, 内海信幸: アメダス観測点を対象とした d4PDF バイアス補正降水量データセットの開発. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_127-I_132, 2018.
- 9) 佐山敬洋, 岩見洋一: 降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用. 土木研究所土木技術資料, Vol.56, No.6, 2014.
- 10) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami K.: Rainfall-Runoff-Inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.57, No.2, pp.298-312, 2012.
- 11) Sayama, T.: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model Manual ver. 1.4.2, ICHARM-PWRI, 2017.
- 12) 山崎大, 富樫冨佳, 竹島晃, 佐山敬洋: 日本全域高解像度の表面流向データ整備. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_163-I_168, 2018.
- 13) 大矢雅彦・春山成子・平井幸弘・松田明浩: 吉野川流域水害地形分類図(平成7年度版). 建設省徳島工事事務所, 1995.
- 14) 小出博: 日本の河川研究. 東京大学出版会, 1972.

(2019. 4. 2受付)