

水災害ハザード予測の最前線

水災害レジリエンスの向上に向けて

立川康人

京都大学 大学院工学研究科
社会基盤工学専攻 教授



協力



発行日
2026年3月

概要

水災害ハザードとして洪水を取り上げ、洪水ハザードの予測手法とその予測情報を用いた水害リスクの推定事例を紹介する。まず初めに水災害ハザードとリスクの予測の考え方について概説し、洪水ハザードとリスク推定の基本となる洪水予測手法とその発展経緯を述べる。次に、極端な洪水の頻度と強度が地球温暖化によって変化する可能性について、日本と東南アジアの主要河川を例として分析した例を紹介する。次に、水災害ハザードとリスクの予測精度を向上させるための基本技術である降雨流出シミュレーションモデルの精度向上に関する研究を取り上げる。最後に、水災害レジリエンスを高めるための今後の技術的課題についてまとめる。

目次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 要約 (Executive Summary) | 4 |
| 1. はじめに | 10 |
| 2. 水災害ハザードと水災害リスクの予測 | 14 |
| 2.1 豪雨・洪水の頻度と強度の関係の予測 | 16 |
| 2.2 豪雨・洪水のリアルタイム予測 | 17 |
| 2.3 水害ハザード予測から水害リスク予測へ | 18 |
| 2.4 水害ハザード予測の課題 | 19 |
| 3. 洪水流出予測手法の発展の経緯 | 20 |
| 3.1 降雨流出システムとそのモデル化 | 22 |
| 3.2 概念的な降雨流出モデル | 24 |
| 3.3 空間分布情報を反映した降雨流出モデル | 25 |
| 3.4 河川の流れや浸水・氾濫を一体的に予測する降雨流出氾濫モデル | 26 |
| 3.5 降雨流出モデルの役割と課題 | 27 |
| 4. 気候変動による洪水ハザードの強度・頻度の変化予測 | 28 |
| 4.1 日本の主要河川における年最大降水量と年最大ピーク流量の変化 | 30 |
| 4.2 日本全国の一級水系109河川における年最大ピーク流量の変化 | 38 |
| 4.3 d4PDFを使用したベトナム・紅河の極値流量の将来変化予測 | 42 |
| 4.4 d4PDFを使用したタイ・チャオプラヤ川の極値流量の将来変化予測 | 47 |
| 5. 河川流量の予測手法の高精度化 | 52 |
| 5.1 土地被覆情報を反映した分布型降雨流出モデルのパラメータ同定 | 54 |
| 5.2 表層土壌情報を加えた分布型降雨流出モデルのパラメータ総合化 | 58 |
| 6. 今後の課題 | 64 |
| 参考文献 | 68 |

要約

洪水リスクを把握するためには再現期間が百年を超える規模の洪水を予測する必要がある。数百年の流量時系列データがあれば、その流量データを統計的に解析して再現期間200年といった稀な洪水の大きさを予測することができる。そうした長期の流量観測データは存在しないが、最近は気候予測モデルを用いて数千年の観測期間に対応するアンサンブル気候情報データベースが作成されるようになった。その中の降水データを用いれば数百年の再現期間に対応する洪水情報を予測することが可能となっている。

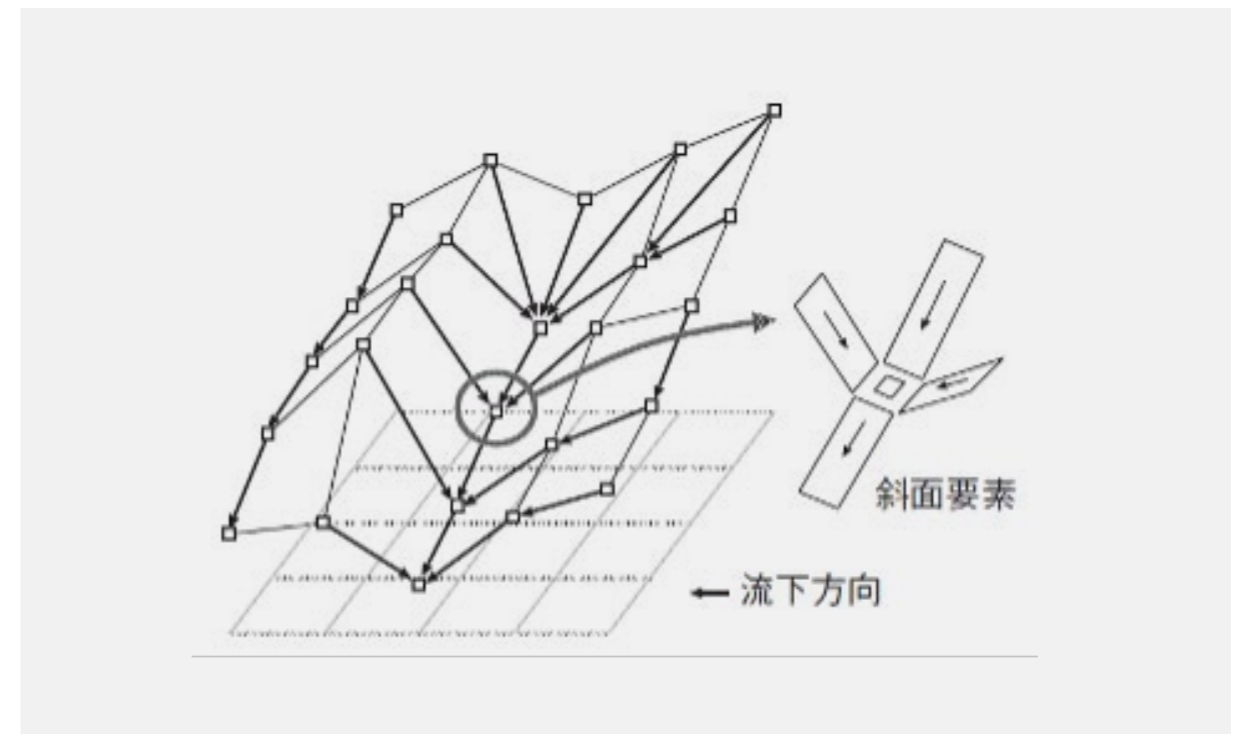


図-1 数値標高データを用いた流域地形表現と分布型降雨流出モデルへの利用。

本レポートでは、図-1に示すような地形や土地被覆、表層土壌、地質などの空間分布情報を反映させる分布型降雨流出シミュレーションモデル1K-DHMを用いて、地球温暖化による洪水の頻度分布の変化を予測した研究例を紹介する。地球温暖化シナリオ情報としては「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)」を用いた。

図-2は淀川流域の枚方地点を対象として求めた年最大時間流量の頻度分布図である。4度上昇する温暖化シナリオでは、年最大流量はどの海水温分布パターンでも現在気候シナリオである過去実験よりも大きくなり、非超過確率（再現期間）が大きくなるほど増加率が大きくなることがわかった。再現期間200年の年最大流量を過去実験と4度上昇実験とで比較すると1.5倍から1.7倍の増加となった。また、4度上昇実験での200年確率年最大流量は最大クラスと考えられる過去実験の900年確率年最大流量よりも大きくなった。同様の分析結果が日本全国の一級水系109河川流域でも得られた。

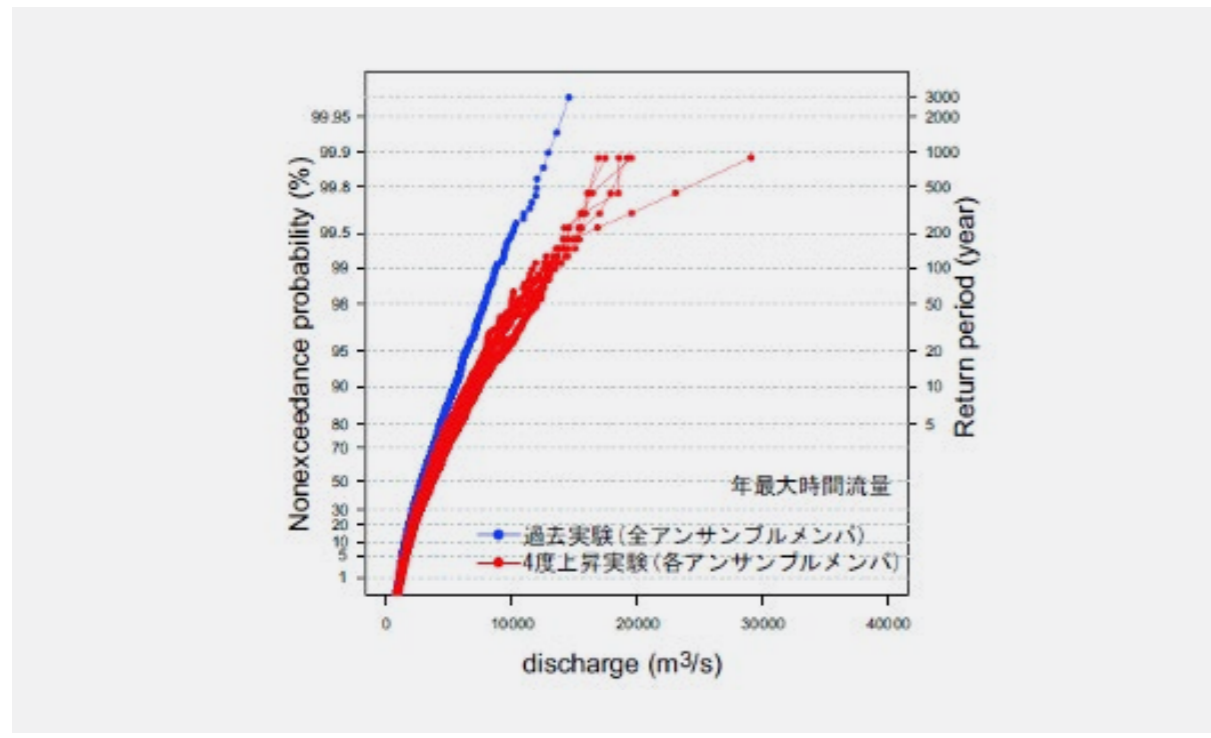


図-2 淀川流域 (枚方地点) の年最大時間流量の頻度分布図。青線は過去実験、赤線は4度上昇実験 (海水表面温度の異なりシナリオデータ) の確率プロットを示す (立川ら (2017) より)。

同様の河川流量予測シミュレーションを中国とベトナムを流れる紅河とタイのチャオプラヤ川で実施した。チャオプラヤ川流域での分析結果を図-3に示す。気候変動に伴い年最大流量が顕著に増加することがわかった。再現期間100年に相当する過去実験と2°C上昇実験の年最大流量の変化率は1.20~1.35倍、過去実験と4°C上昇実験の年最大流量の変化率は1.55~1.63倍となり、日本と同様にチャオプラヤ川や紅河でも洪水リスクが増大することがわかった。

こうした河川流量の変化予測を任意の河川流域で実現し水害リスクを予測することが重要な課題である。そのためには任意の河川流域に適用できる降雨流出シミュレーションモデルが必要となる。予測の蓋然性を高めるためには物理的な基礎式から構成される降雨流出モデルを構築し、そこで使われるモデルパラメータ値をチューニングすることなく土地被覆や表層土壌、地質の物性に基づいて定めることができることが望ましい。そうした研究はこれまでも数多く行われているが、未だに解決されていない。世界中の任意の河川流域に適用できる降雨流出予測モデルの開発とモデルパラメータ値の標準値を土地被覆や表層土壌、基岩の物性から定められるような技術開発が必要である。

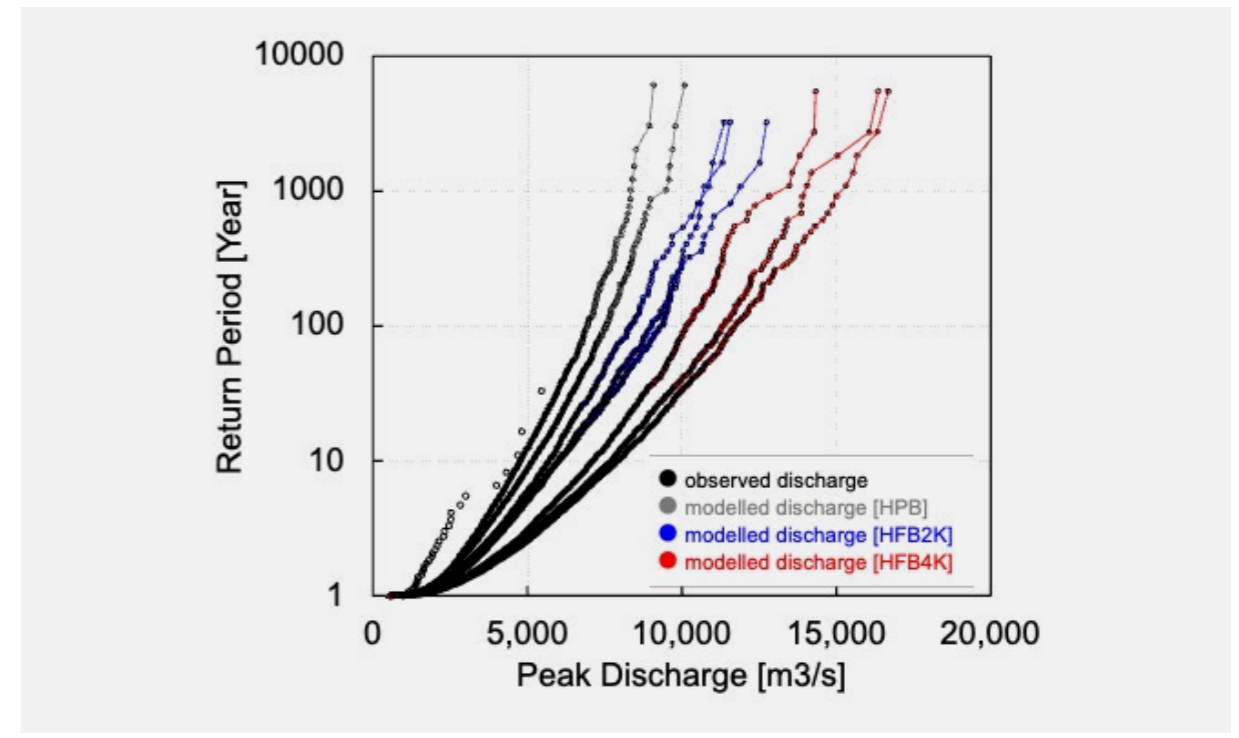


図-3 チャオプラヤ川ナコンサワン (C2) 地点での年最大流量の頻度分布の変化。過去実験、2度上昇実験、4度上昇実験の違いを示す (加藤ら (2022) より)。

その技術開発の一環として、複数地点、複数の洪水事例を用いて分布型降雨流出モデル1K-DHMの土地被覆毎のパラメータを同定する手法を開発し、九州の菊池川流域を対象として洪水予測の精度向上を確認した研究を紹介する。菊池川の土地被覆情報をもとに同定したパラメータ値は、再現性の検証に使用した九州地方の15流域における104観測地点中、Nash係数0.5以上0.8未満の地点が41地点、0.8以上の地点が47地点となり、多くの地点で良好な再現性を示すことがわかった。

さらに、土地被覆情報に加えて土壌分布情報を分布型降雨流出モデル1K-DHMに反映させることにより、より精度が高まることがわかった。図-4にその結果の一例を示す。パラメータ同定計算の対象とした菊池川の流量観測地点の再現性が改善し、さらに菊池川流域と土地被覆・土壌特性の類似した観測地点の流量再現性も改善が見られた。この結果は、パラメータ同定時に、より多様な特性をもつ複数の観測地点の情報を用いることにより、再現性の良好なパラメータの値を得ることができる可能性を示している。

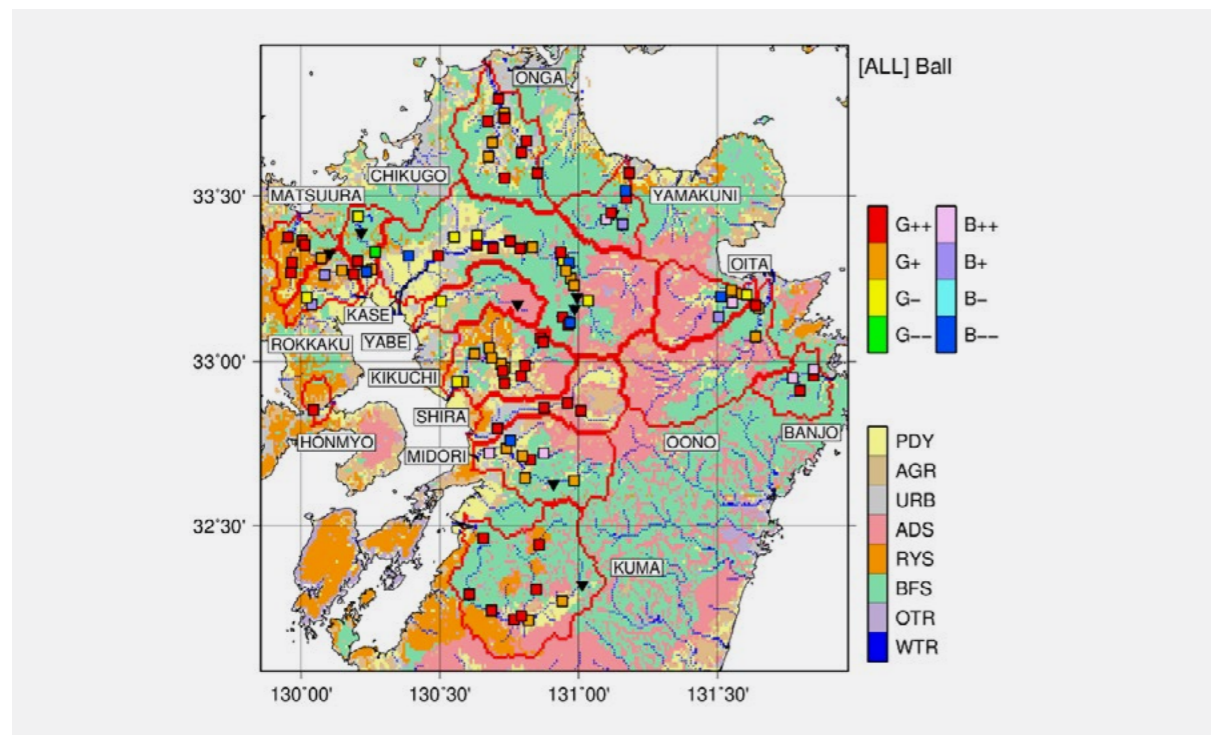
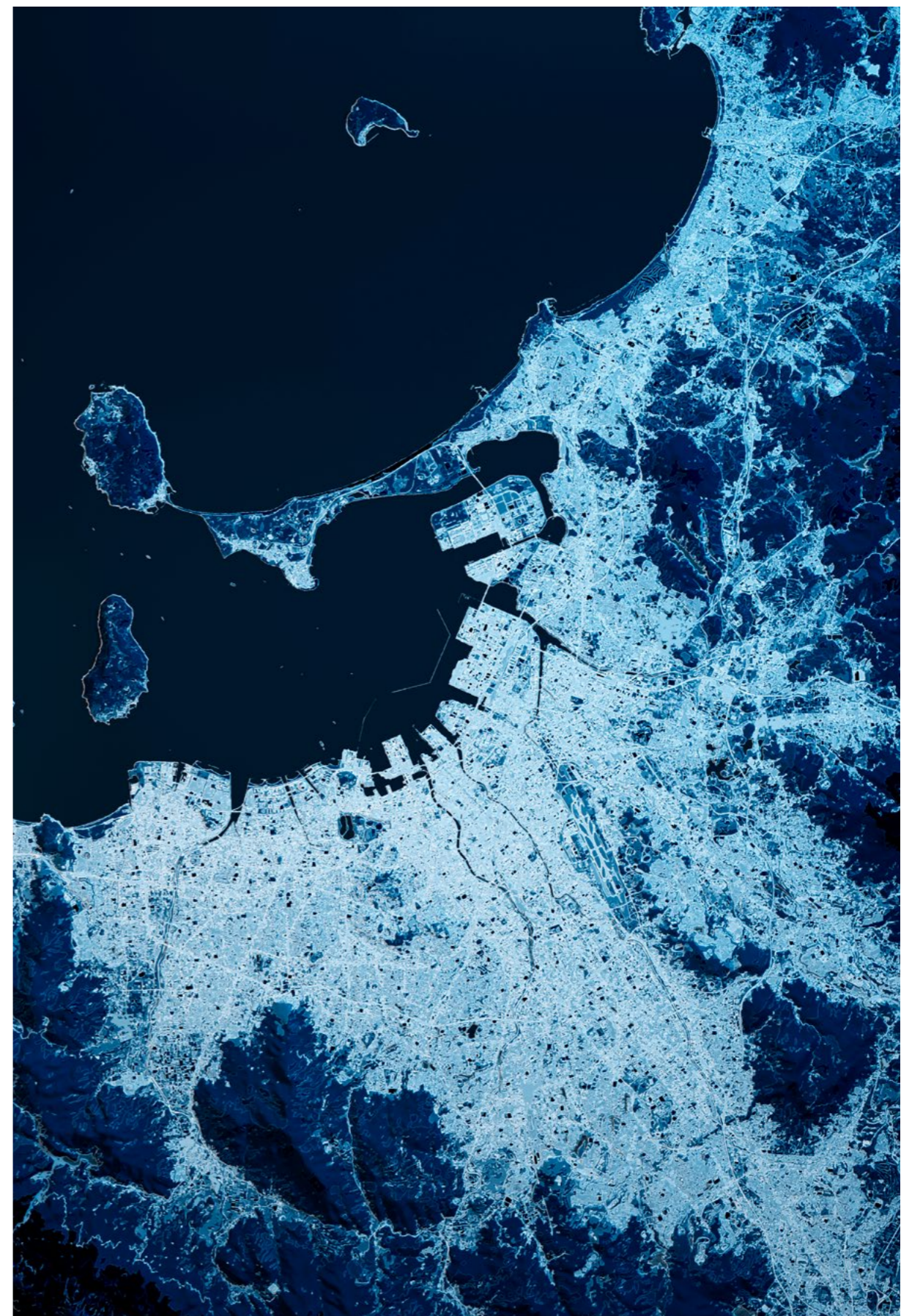


図-4 九州地方の土壌分布情報とその土壌分布の反映させたNash係数の改善を示す8つのカテゴリの空間分布。河道上の□が観測地点であり観測地点ごとにカテゴリ分類を示す(加藤ら(2025)より)。

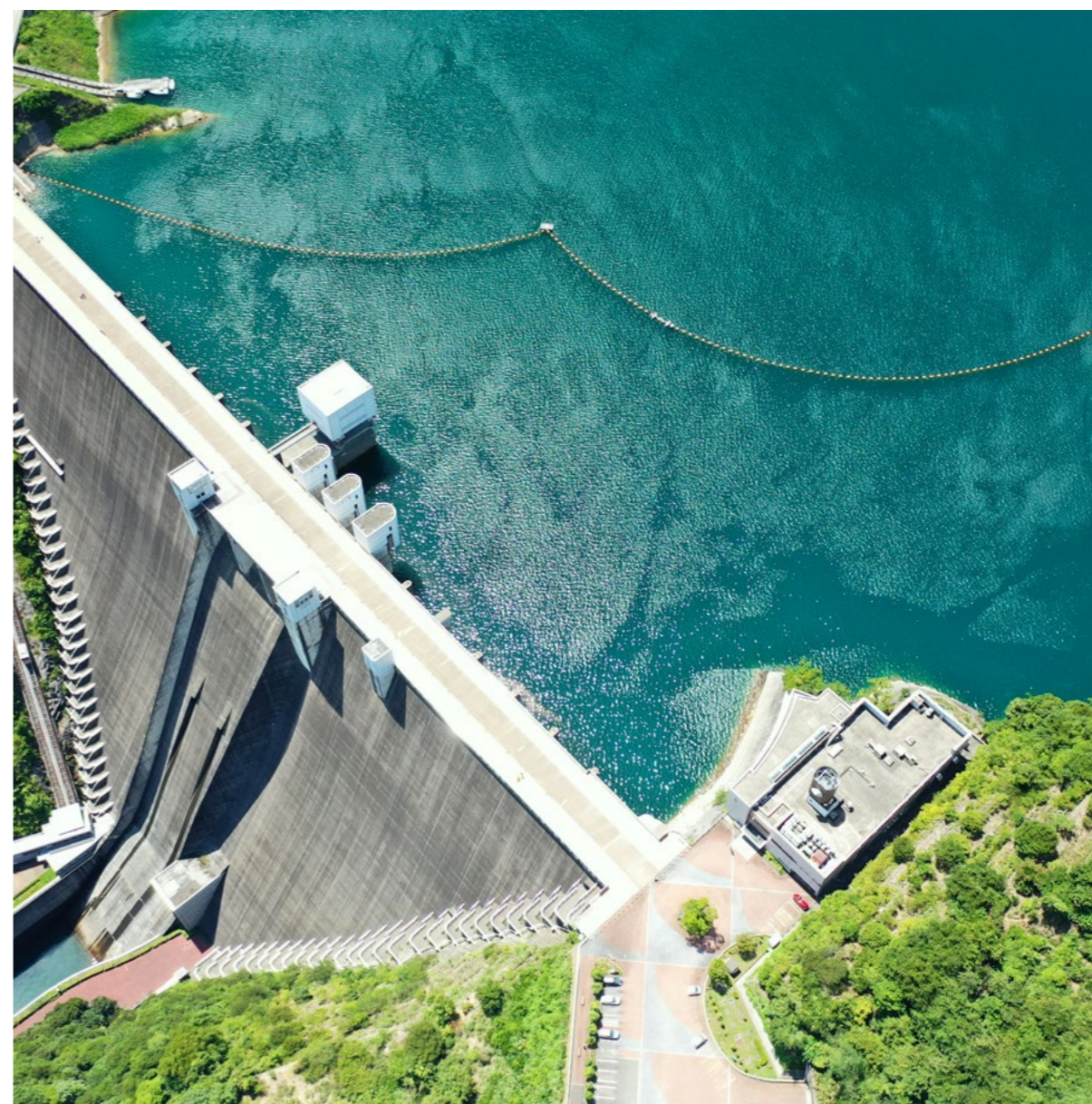
水害リスク情報の精度を高めるためには、入力情報となる降水データセットの整備と同時に、任意の河川流域での洪水・氾濫予測を可能とする水工シミュレーションモデルの高度化が欠かせない。本レポートで紹介したように、水害リスクを予測する基本は河川流量の予測精度を高めることにある。地形情報や土地被覆、表層土壌、地質に関する空間情報の高解像度化が進んでおり、これらの情報を用いて降雨流出シミュレーションモデルの地域総合化を急ぐ必要がある。あらゆる河川流域に適用し、あらゆる地点での河川流量を予測する降雨流出シミュレーションモデルを開発して、水文観測情報の存在しない河川流域でも河川流量をある一定の精度をもって予測することが重要な研究課題である。

こうしたリスク情報の整備は、日本の河川流域だけでなく世界の任意の河川流域が対象となる。世界のどこかで大水害が発生すれば、その地域の社会経済に大きな影響を与え、それは日本の社会経済にも影響を及ぼす。世界の水災害の防止・軽減に貢献するために、また世界に展開する日本企業や日本国民が洪水の被害を受けないようにするために、世界の任意の河川流域に適用できる洪水予測手法を開発し、水災害ハザード・リスク情報を生成することが重要となる。



1. はじめに

極端な大雨の発生頻度や強度が年々増加し、豪雨の発生に地球温暖化が影響していることが気象庁によって報告されている（気象庁（2025））。今後も極端な大雨の発生頻度や強度が増加する傾向にあることが気象庁によって報告されており、多くの研究者や技術者によって地球温暖化の台風や梅雨への影響の分析、降水強度が増加することに伴う河川流量の増大や浸水・氾濫への影響の分析が進んでいる。政府はこうした科学的な気候変動予測の研究成果を治水対策に導入し、短時間の降水強度が現状よりも北海道で1.15倍、それ以外の地域で1.1倍増加するとして河川計画の見直しを図っている（国土交通省、2021）。こうした気象外力の高まりを受けて、洪水発生に対して求められる予測情報は、河川地点の河川流量や水位情報だけでなく、流域全体の河川水位の連続的な情報や、さらには市街地の浸水の広がり、河川堤防を越えて氾濫する氾濫水の挙動予測へと大きく進展している。



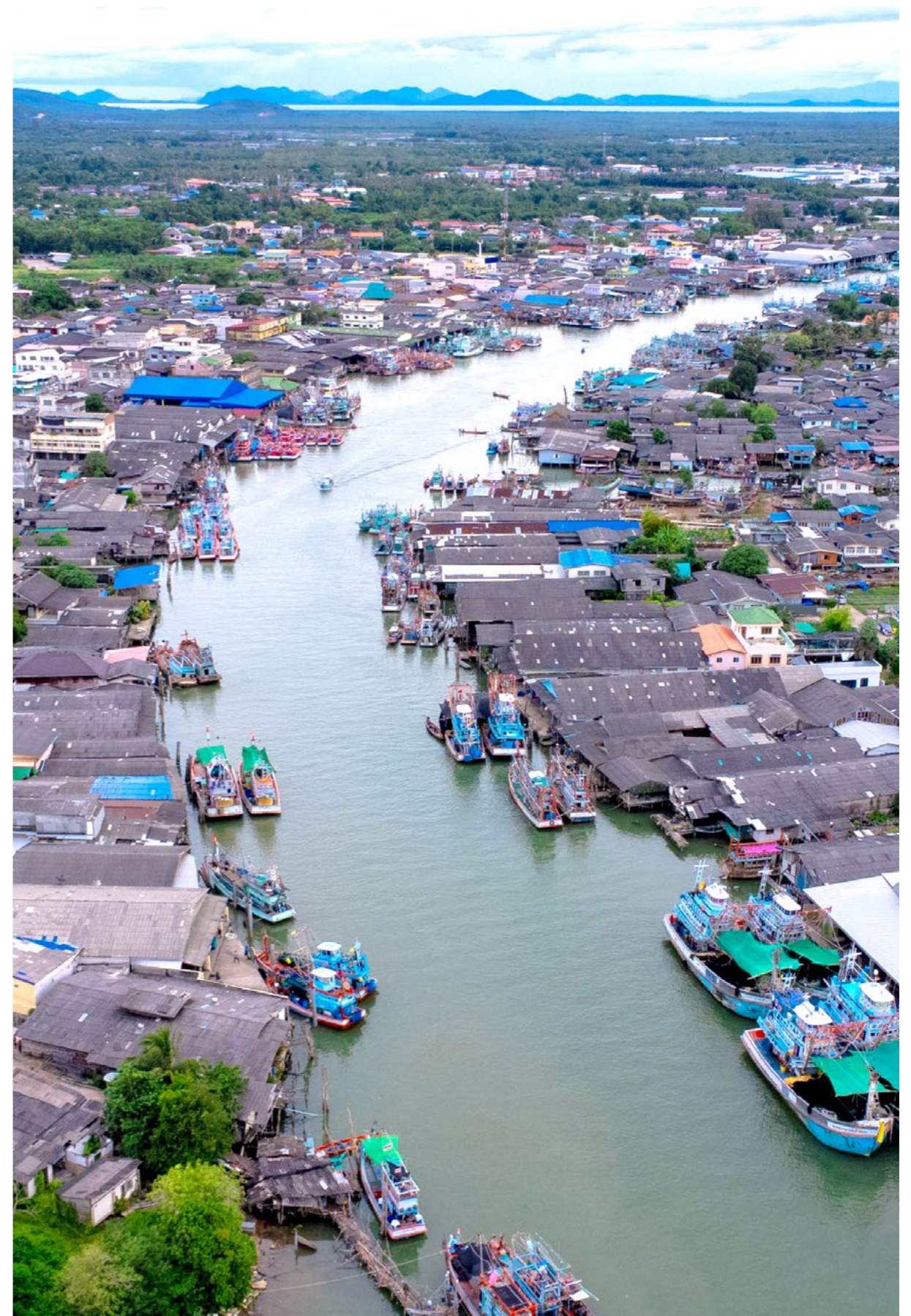
それらに対応して水災害ハザードを分析し予測する学術や技術も大きく変化してきた。洪水時の水の流れを力学的に扱う学術分野が水理学であり、より大きなスケールで水循環の物理的なメカニズムを扱う学術分野が水文学である。水理学は流体力学を基礎として河川流の力学的な分析と予測を対象とする。もっとも断面積が小さく多くの流量を流すことができる河川断面の設計や水路の縦断的な設計、ダム・水門の設計は水理学が古典的に扱ってきた分野である。水の流れだけでなく土砂の流れも扱う。洪水時に橋脚や堤防に及ぼす流体力や土砂の流れの力学的なメカニズムの分析、河川

内の樹木が洪水流に及ぼす影響の分析は今でも重要な研究課題である。三次元的な水の流れ解析とともに魚類や水生生物の生態環境を分析し、河川環境と治水・利水のための河川改修とを両立させる川づくりの基礎的な知見も水理学によって与えられる。

一方で、水文学は、大気や樹木を含めた地球表面および地表面に存在する水循環と水収支を人間活動や物質循環と合わせて理解し、その挙動を予測することを目的とする。気象学、気候学、農学、林学、陸水学などと密接に関連する学際的な学問分野であり、工学だけでなく理学や農学の分野でも基礎的な科目として大学の講義で提供される。工学分野では、特に極端な降水現象（大雨や少雨）が発生した場合も日常生活に支障がでないように、洪水や渇水による災害防止・軽減を目的とする社会基盤施設を合理的に計画・設計するための基礎的情報を与える分野として、水文学が発展してきた。気候変動時の降水の時空間パターンの変化や洪水・渇水の頻度や強度の関係の変化を分析することは、今の水文学の重要な研究課題である。

従来、政府や地方自治体が実施する治水計画では、河川計画の基準となる地点での流量を予測すること、それを安全に流下させるための河道を合理的に設計することが求められてきた。現在は河道の設計だけでなく河道で流しきれない洪水流が河川堤防を越えて市街地に氾濫することを予測すること、下水道の排水能力を上回る豪雨が発生した場合の浸水域の空間的な広がりを予測すること、さらに家屋被害や農林水産業および商工業に関する被害予測、物流への影響などを含めた経済被害等を予測して提供することが求められている。このためには、降雨予測情報をもとに河川流量を予測し、さらにそれが河道の流下能力を上回った場合に氾濫して市街地に広がる状況を予測した上で、それを被害予測に結びつける必要がある。豪雨時の雨水の流れを流域全体で予測してハザード情報を生成し、それをリスク情報にまで展開して、ハード的な被害回避・軽減対策と水害に強いまちづくりを組み合わせ、さらに損害保険による迅速な生活復旧を組み合わせることで総合的に水災害レジリエンスを向上させることが求められている。

水災害ハザードの予測は、治水計画や河川整備、まちづくりや損害保険を対象とするハザード予測、いわゆる「計画のための予測」と、ハザード事象が時々刻々進行している最中の状況を予測するリアルタイム予測がある。いずれの予測も、大雨を予測し、それを用いて河川の流量や市街地の氾濫情報、さらにリスク情報に翻訳する技術が必須となる。以下では、水災害ハザードとして洪水を取り上げ、洪水の予測手法とそれによって引き起こされるリスクの予測手法を概説する。2. で洪水災害を引き起こす洪水予測とリスク予測の考え方を述べ、3. で洪水予測手法の発展の経緯を概説する。4. では豪雨・洪水の発生頻度と強度の関係が地球温暖化によってどのように変化する可能性があるかを日本および東南アジアの河川で分析した例について、筆者らが関わってきた研究を紹介する。5. では水災害ハザードとリスクの予測精度を向上させるために、筆者らが現在取り組んでいる研究を取り上げる。最後に、以上の内容をまとめて、防災・減災意識の向上や行動変容を実現し、社会の災害レジリエンスを高めるために、今後の課題について議論する。



2. 水災害ハザードと水災害リ スクの予測

市街地で発生する浸水や洪水氾濫による水災害は、極端な大きさの降水や河川流、高潮や高波によって発生する。これらの災害発生を引き起こす大雨や洪水、高潮、高波を水災害ハザードという。これらは水災害を引き起こす自然外力とよばれることもある。ハザードが発生したとしても必ずしも災害が発生するわけではない。

大規模な洪水氾濫が発生したとしても、そこに人々が居住しておらず社会・経済活動が行われていなければ被害は発生せず、災害リスクは存在しない。社会・経済的な営みが行われている地域に極端に大きな自然現象（ハザード）が発生し、そのハザードの大きさが治水施設などのハード的な備えや水害保険などのソフト的な備えのレベルを超えたときに災害が発生する。水災害ハザード発生頻度と大きさに応じて引き起こされる被害の頻度と大きさの関係が水災害リスクとなる。

水災害ハザードを事前に予測することが、水災害リスクを事前に予測することにつながる。水災害ハザードの予測には治水計画等を立案するための予測とリアルタイム予

測がある。計画のための予測は、いつ、その災害が発生するかは予測対象とはせず、ハザード発生頻度と大きさの関係を予測することに重点を置く。治水計画を例として例を示すと、ある河川の基準地点を対象として洪水発生に関係する降水期間（日本の河川流域では数時間から数日）を定め、平均的にT年間に一回の頻度で発生する降水量や河川流量の大きさを予測することが目的となる。一方で、リアルタイム予測は、時々刻々、現象が進む中で数時間から数日先の降水強度や河川流量・水位を予測することが目的であり、いつ災害が発生するかが重要な予測対象となる。避難のための予警報の発令や治水施設の管理をはじめとして、様々な活動で被害を回避するために利用される。

2.1 豪雨・洪水の頻度と強度の関係の予測

大雨の頻度と強度の関係、たとえば平均的に100年に1回の頻度で発生する年最大24時間雨量を得ることが分析対象となる。この分析手法は水文頻度解析（たとえば、池淵ら（2006）；椎葉ら（2013）；国土交通省 河川砂防技術基準調査編）とよばれ、世界的に解析手法が標準化されて様々な分析ツールがパッケージ化されている。水文頻度解析手法によって大雨発生頻度と強度の関係を分析し、ある再現期間を安全度のレベルとして定めて、それに対応する大雨の大きさを求め、次に、その大雨によって発生する洪水を予測する。この情報を用いて、ここで定めた洪水が発生しても被害が出ないように治水施設を計画し設置する。

地球温暖化に伴い大雨の発生頻度が変化するのはないかということが、社会的に重要な分析対象となる。洪水や渇水を防ぐための水工施設はある再現期間を安全基準として設計され設置されている。設計当初に設定した安全基準が今後とも機能するか、そうでなくなるかを明らかにすることが社会基盤整備や損害保険の運営に重要な情報となる。たとえば現時点で100年に1回の頻度の大雨が地球温暖化によってたとえば70年に1回発生する可能性があるといったハザードやリスクに関連する水文量の確率・統計的な特性の分析が、社会基盤整備や損害保険を運営するための重要な情報となる。リスクが変化すれば、それに対して適切な対策を立てる必要があるからである。

日本の一級水系109河川では、治水整備の基本となる対象洪水を、政府が治水事業の方針を記載する「河川整備基本方針」の中で定める。この基本方針で定める治水レベルの目標となる洪水を基本高水とよぶ。この基本方針を実現するために、今後20年から30年の間に実施する具体的な実施計画を定める「河川整備計画」を策定する。この計画に沿って全国的に同様の治水レベルが維持されるように治水事業が進められる。治水レベルとして定められる治水安全度は大雨の再現期間によって設定する。利根川や荒川、淀川、木曾川、筑後川など大都市圏を流れる河川では、再現期間200年を治水安全度として政府が定め、その大雨によって発生する洪水を基本高水とする。再現期間は、河川流域の人口や資産を考慮して定められ、一級河川の場合100年から200年を再現期間としている。

基本高水の定め方は、国土交通省の河川砂防技術基準計画編（令和7年8月時点）に記載されている。まず計画降雨を設定し、それを入力データとして降雨流出モデルによって対象地点の河川流量を算定する。治水レベルを再現期間200年の大雨に対応す

2.2 豪雨・洪水のリアルタイム予測

豪雨が進展するなかで、時々刻々、数時間・数日先までの洪水予測情報を提供することがリアルタイム洪水予測である。我が国では気象庁が日本全国を対象として1km空間分解能で、流域雨量指数や表面雨量指数、土壌雨量指数といった洪水災害や土砂災害の危険度情報を「キキクル（危険度分布）」という名称を付けてリアルタイムで配信している。<https://www.jma.go.jp/bosai/risk/>という名称を付けてリアルタイムで配信している。流域雨量指数や土壌雨量指数は、降水データを入力情報として降雨流出モデルの一つであるタンクモデルを用いて河川流量や土壌水分を計算し、それらを指標として洪水災害や土砂災害の危険度を相対的に表現する。これらの指標は警報や注意報を出す判断基準にも用いられている。

流域雨量指数は降水データから算定される指標であり、物理的な流量や水位と直接比較するものではないが、その値は降雨流出モデルから得られた流量の計算値であり、観測された水位とよく対応することが示され

るレベルとするならば、計画降雨として再現期間200年の大雨の時系列データを必要とする。しかし、そうした降水観測データは一般に存在しない。日本で降水観測が始まったのは1875年であり、もっとも長い観測期間を有する降水データであっても高々150年しかない。そのため確率統計的な手法を用いて外挿によって再現期間200年の降雨時系列データ（計画降雨）を生成する。

最近では、気候モデルによって数千年に相当する降水時系列シミュレーションデータが生成されている。そのデータを用いて従来の確率統計モデルを用いることなく、生成したデータそのものから再現期間200年の計画降雨を生成することができるようになってきた。計画降雨が定めれば、それを降雨流出モデルへの入力データとして河川流量を算定する。降雨流出モデルは降水データを入力データとして対象地点の河川流量を算定するシミュレーションモデルであり、その精度がハザードやリスクを推定するカギとなる。3. では代表的な降雨流出モデルを紹介する。

ている（気象庁大気海洋部気象リスク対策課（2023））。土壌雨量指数は1km空間分解能ごとに計算されているタンクモデルの水深であり、山腹斜面にどれだけ雨水が含まれているかを表現している。

国土交通省は、洪水予報河川を対象として河川水位を予測し、河川区間ごとに越水の危険度情報を「水害リスクライン」<https://frl.river.go.jp/>を用いてリアルタイムで配信している。降雨流出モデルで得られた河川流量を対象河川区間の上流の流量とし、時々刻々、河川水位を予測している。これまで、気象庁が提供する「洪水警報の危険度分布（洪水キキクル）」と国土交通省が国管理区間を対象として提供する「水害リスクライン」はそれぞれ別のホームページから提供されてきたが、令和5年2月からは気象庁の洪水キキクルのページで一体的に情報を得ることが可能となった。

2.3 水害ハザード予測から水害リスク予測へ

計画のための予測もリアルタイム予測も、ハザード予測からリスク予測へと期待される情報が高度化している。洪水ハザードマップは、想定最大規模（再現期間1000年）と計画規模（再現期間50年～200年）のシナリオのもとで洪水浸水想定シミュレーションを実施し、浸水域の広がりを地図上に表示したものが作成されてきた。これらに加えて、まちづくりや住まい方に役立てることを目的とし、より発生頻度が高い降雨シナリオ（再現期間10年、30年、50年）での浸水範囲や浸水深を示す多段階の浸水想定区域図も作成され公開されるようになってきている。これらの浸水想定区域図をもとに、影響を受ける地域や人口の分析、被害額の推定、避難経路の確保などリスク想定とリスク回避のために必要とされる情報も生成されるようになってきている。降雨流出モデルによる河川流量予測と氾濫解析を用いて作成されている水害ハザードとリスク情報の代表的なウェブサイトを下に示す。



水害リスクマップ（浸水頻度図）と降雨規模別の多段階の浸水想定図（国土交通省が管理する河川区間）
https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/risk_map.html

水害リスクマップ（浸水頻度図）と降雨規模別の多段階の浸水想定図（地方自治体が管理する河川区間）たとえば「大阪府 洪水リスク表示図」
<https://www.river.pref.osaka.jp/>

ハザードマップポータルサイト（国や地方自治体が作成する洪水ハザードマップへのリンク）
<https://disaportal.gsi.go.jp/>

リアルタイム洪水予測情報として前節で紹介したキキクルでは、危険度を5段階で示し警報の発令に利用している。

キキクル（危険度分布）
<https://www.jma.go.jp/bosai/risk/>

水害リスクライン
<https://frl.river.go.jp/>

気候関連財務情報開示タスクフォースTCFD（Task Force on Climate-related Financial Disclosures）の提言を踏まえて、住民を対象としたリスク情報の開示だけでなく、国土交通省は民間セクターを対象として「TCFD提言における物理的リスク評価の手引き～気候変動を踏まえた洪水による浸水リスク評価～、https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tcfd/index.html」を作成している。リスク情報は上記以外にも様々な情報が考えられる。



2.4 水害ハザード予測の課題

洪水予測やそれに関するリスク予測を全国的に実現するためには、河川流量を精度よく予測することが基本となる。河川流量の予測には降水情報を河川の流量に変換する降雨流出シミュレーションモデルが使われる。降雨流出シミュレーションモデルの構造を適切に定め、そこでの雨水の挙動を支配する流れの特性値（モデルパラメータ）を適切に定めることが、予測精度を高めるために必要となる。モデルパラメータ値は土地被覆や表層土壌、基岩の特性が関係すると考えられるが、降雨流出シミュレーションモデルのモデル構造やシミュレーションモデルの空間的解像度が原因となって、現地で測定した土壌サンプルで得られる水理特性をシミュレーションモデルに反映することは容易ではない。表層土壌や基岩の空間的な分布を捉えたデータが整備されるようになってきたが、地表面下に広がる土壌や基岩の三次元的な分布を示す地理情報データは存在しない。また、現地で測定し

た土壌サンプルはあくまで河川流域のある特定の地点での土壌サンプルであり、それから得られる水理パラメータは空間的な広がりを持つ土壌や基岩を代表する平均的な水理特性を表すモデルパラメータ値とは言えない。

モデルパラメータの値を水文観測データによってチューニングして同定するのではなく、土地被覆や土壌、基岩などの外的なデータから定めて、観測情報の不十分な河川で洪水予測を実現することを目的とする研究が世界的に数多くなされているが、未だに有効な手法が得られていない。任意の河川流域に適用できる降雨流出シミュレーションモデルの開発は洪水に関するハザード予測とリスク予測の基盤となる基礎的な研究である。5.で紹介する（株）東京海上研究所との共同研究では物理的な降雨流出モデルのモデルパラメータ値を合理的に求める研究を進めている。

3. 洪水流出予測手法の発展 の経緯

洪水ハザードとそれに関するリスクを予測するためには、降水強度を河川の流量に変換する降雨流出シミュレーションモデルが必要となる。降雨流出現象の観測とモデル化に関する研究は、我が国では1950年代から始まって数多くの研究がなされている。洪水ハザードとリスクに関する情報に対する要求の高まりと合わせて、降雨流出モデルの精度向上に関する様々な取り組みがなされてきた（たとえば、池淵ら（2006）；椎葉ら（2013）；国土交通省 河川砂防技術基準調査編）。

3.1 降雨流出システムとそのモデル化

山地斜面や農地、市街地に到達した降水は様々な経路を経て河川に流出し、海まで流れる。その過程を図-1に模式的に示す。この図は降水が河川流量となるまでの雨水の変換過程を部分システムの結合として捉え、それらの相互の接続関係を入出力とともに示したものである。四角は部分システム、丸四角は入力または出力、矢印は入力または出力の方向を示している。システムを特徴づける主要な物理量としては

- 入力：システムに作用する外的起因（たとえば降水）
- 出力：システムに作用した一つまたはそれ以上の入力によって生ずる結果（たとえば河川流量）
- システムパラメータ：システムの動特性を支配するパラメータ（たとえば、地形で定まるパラメータや表層、土壌中の雨水の流動を特徴づけるパラメータ）

の3つがある。これらの部分システムを数式で表現し、相互に接続して降水時系列を河川の流量時系列に変換する数理モデルを降雨流出モデルという。降雨流出モデルを構成する場合、通常、図-2のように流域地形をもとに全体流域を適当な大きさに分割し、それぞれの分割流域で降雨流出システムをモデル化して、それらを相互に接続することで全体の降雨流出システムをモデル化する。

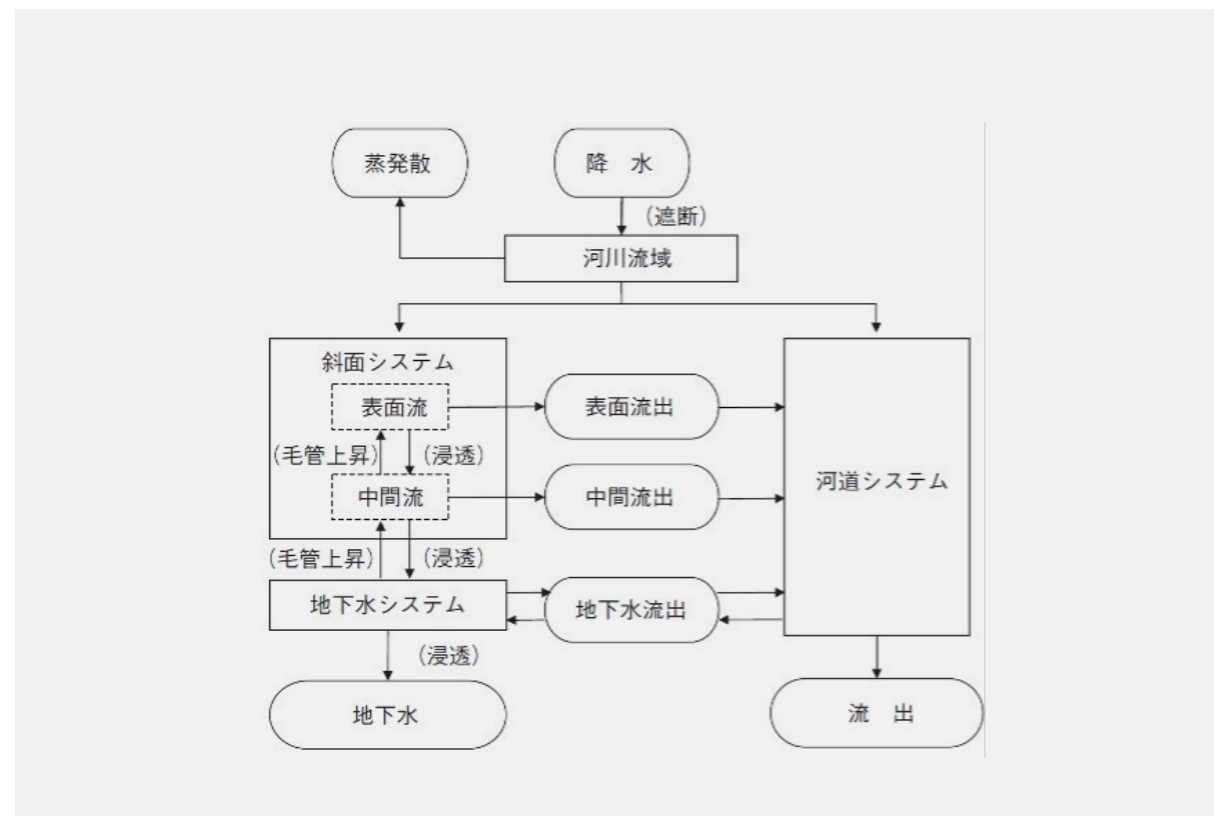


図-1 降雨流出システム (金丸・高棹, 1975)。

降雨流出モデルは、雨水の流れと貯留を概念的に表現する概念的な降雨流出モデルとそれらの水文素過程をできるだけ物理的に表現しようとする物理的な降雨流出モデルに大別される。3.2では代表的な概念モデル

としてタンクモデルを取り上げ、3.3では河川流域の空間的な物理情報をシミュレーションモデルに反映させることを志向する分布型降雨流出モデルを紹介する。

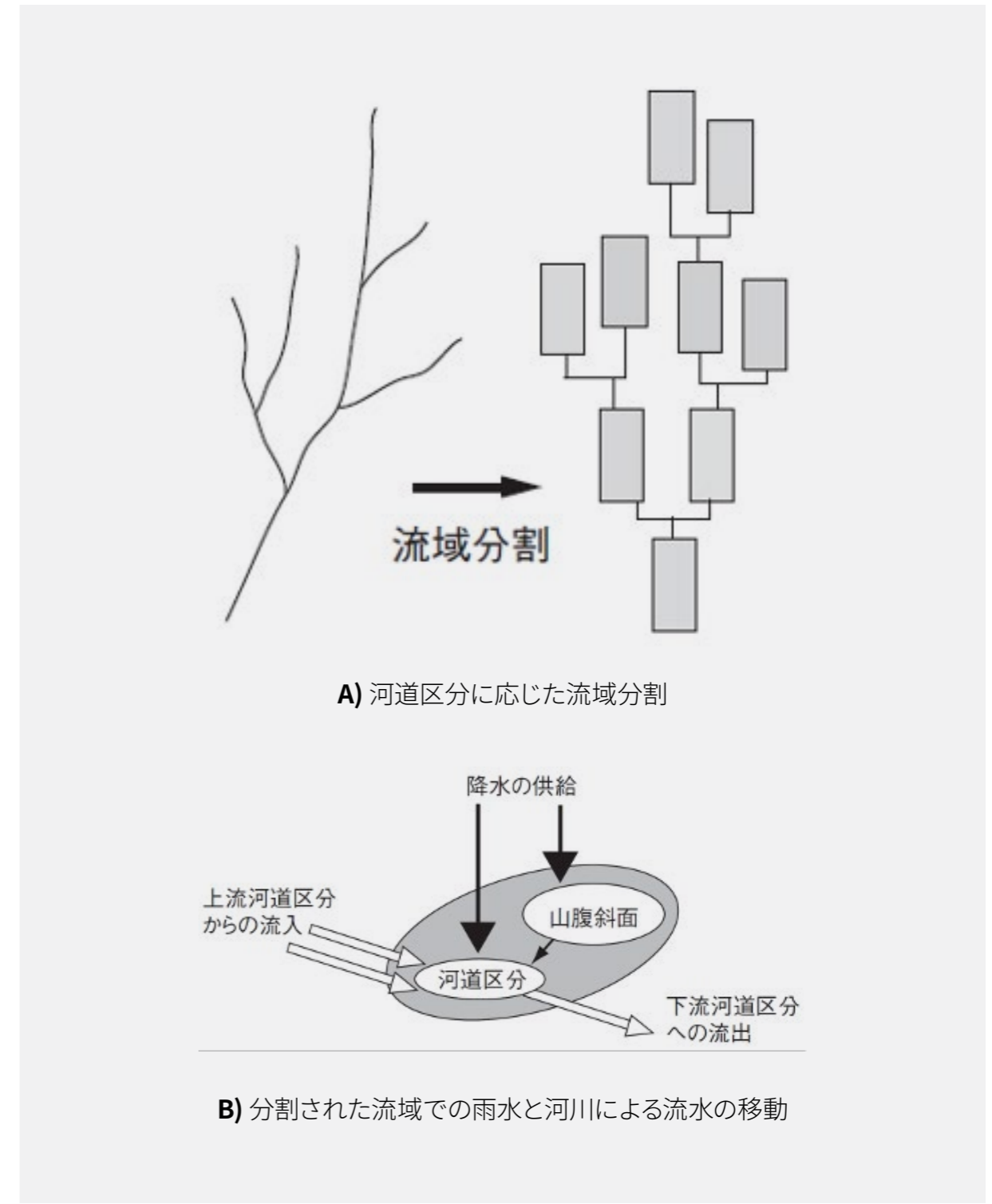


図-2 河川流域の分割 (上) と分割された流域での雨水の流れのモデル化 (下)。

3.2 概念的な降雨流出モデル

代表的な概念モデルとしてタンクモデルがある。数日の洪水予測から年間を通じた河川流量の予測まで多くの適用例がある。タンクモデルの基本的な構造を図-3に示す。タンクの側方と底に流出孔を設定し、タンクを直列に配置して流出を再現する。タンクモデルはモデルの構造の中で地下水流出を表現しており、入力データとして降水量と長期の抽出予測の場合は蒸発散量を与える。タンクモデルはタンクの配列の仕方やタンクの個数、流出孔の個数など無数の組み合わせが考えられるが、わが国では図-3のような四段直列のタンクモデルがよく用いられる。

概念的に上部のタンクからの側方流出を表面流出量、上部から下部のタンクへの流出を下層への浸透量、下部のタンクからの側方流出を地下水流出量と考える。気象庁がキキルで算定する流域雨量指数や表面雨量指数、土壌雨量指数は、日本全国を約1km四方の格子で覆い、それぞれの格子で直列3段および5段のタンクモデルを適用している（気象庁大気海洋部気象リスク対策課（2023））。

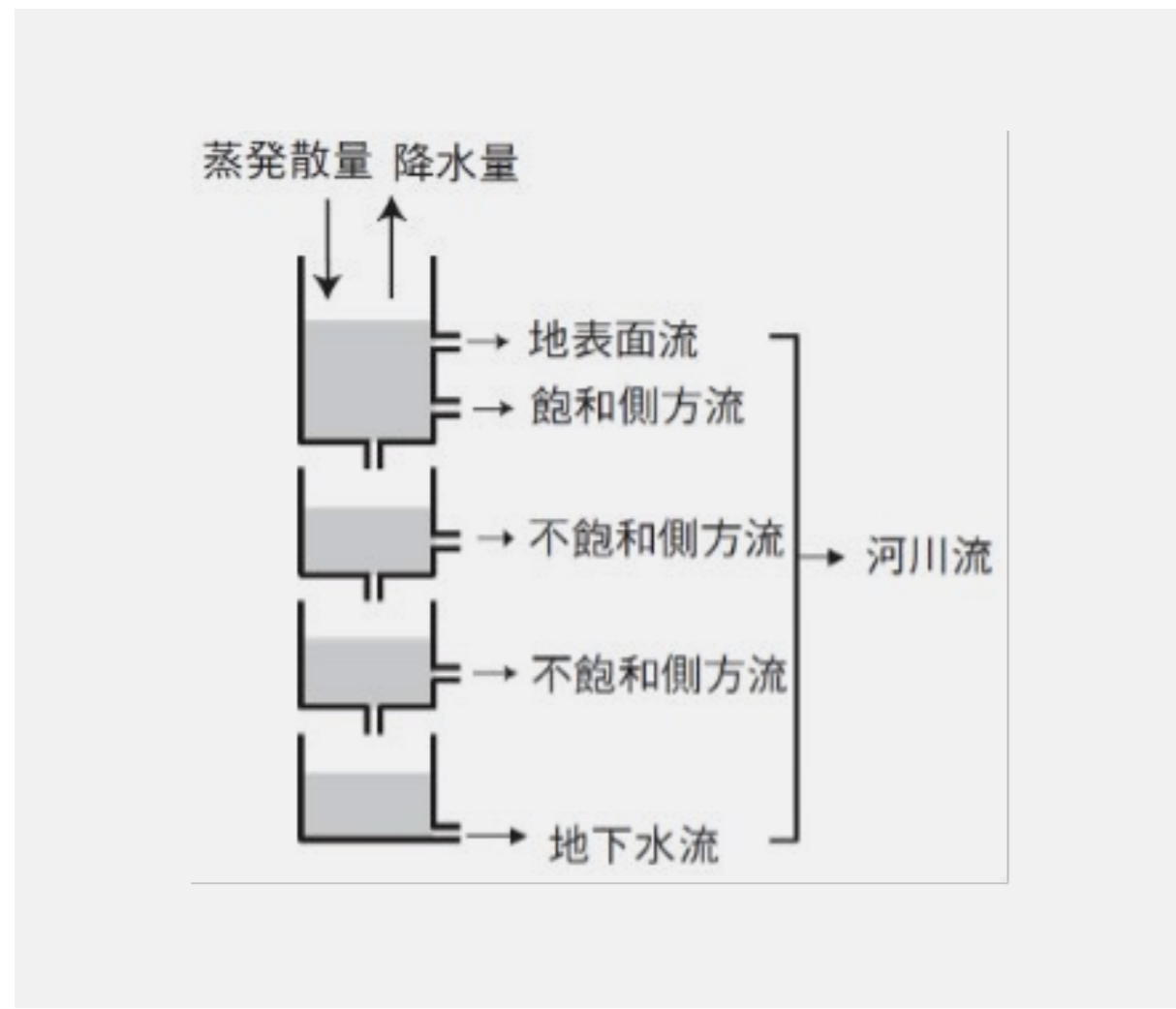


図-3 タンクモデルの構造。

3.3 空間分布情報を反映した降雨流出モデル

地形や土地被覆、表層土壌、地質などの地理情報やレーダ雨量をはじめとする空間分布情報をそのまま反映させることを意図した降雨流出モデルを分布型降雨流出モデルという。代表的な分布型降雨流出モデルの構造を図-4に示す。国土数値情報など、全国を縦横に区切った格子上的の標高データを利用し、各格子点からもっとも勾配が急な方向に雨水が流れると仮定して、雨水の流れ方向を1次元的に定めて雨水の流れを追跡する分布型流出モデルがしばしば用いられる。次章で説明する1K-DHMもこの形式の降雨流出モデルである。

雨水の流れを計算する式の中に地形や土地被覆、表層土壌によって関係付けることができるモデルパラメータを導入することで、モデルパラメータをチューニングすることなく、土地被覆や表層土壌などの空間的地理情報から定めることを志向するモデルである。タンクモデルなど、雨水の流動を概念的に表現したシミュレーションモデルと対比して、物理的な分布型降雨流出モデルとよばれることがある。

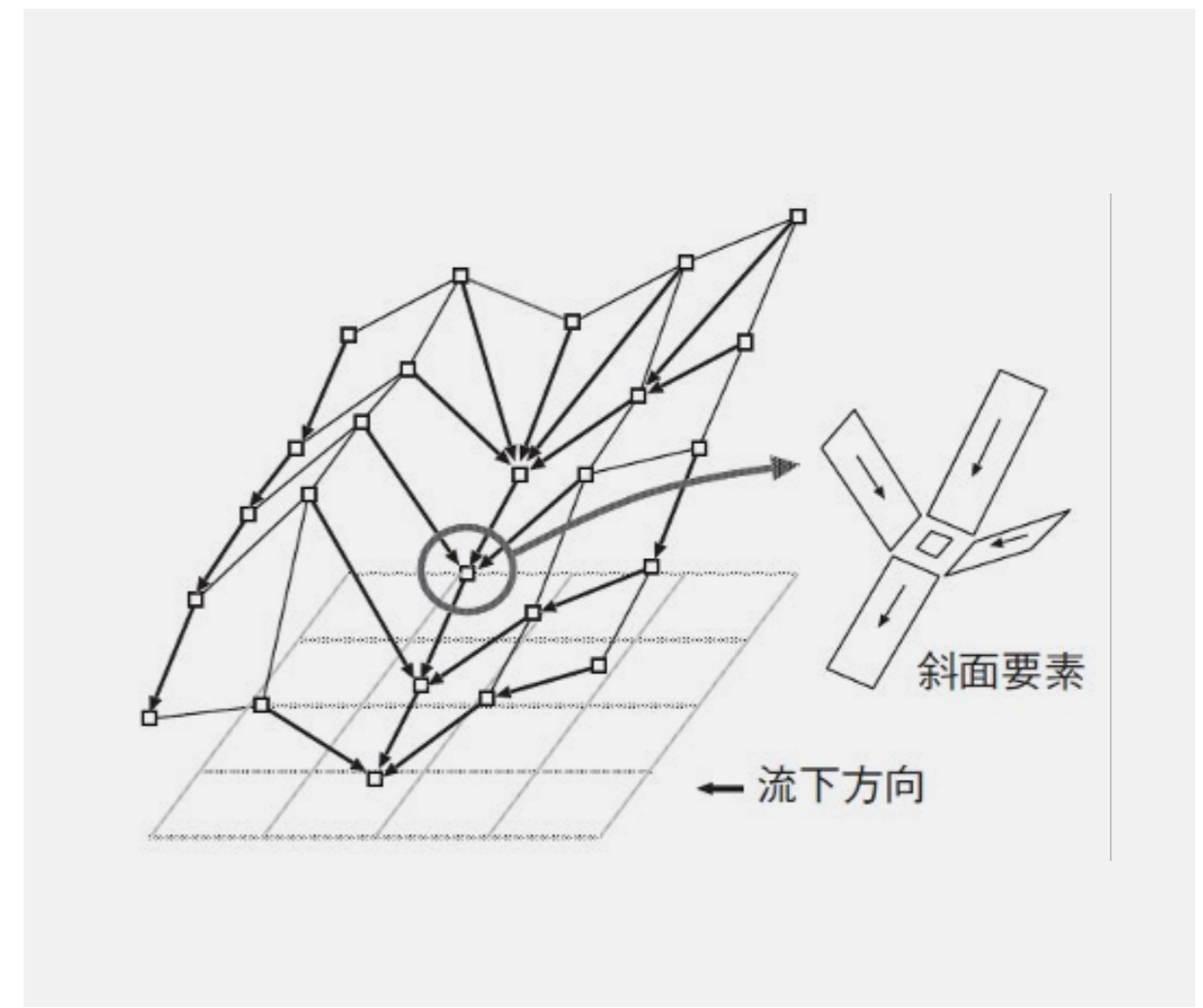


図-4 数値標高データを用いた流域地形表現と分布型降雨流出モデル。

3.4 河川の流れや浸水・氾濫を一体的に予測する降雨流出氾濫モデル

市街地に降った大雨の強度が下水道による排水強度を上回る場合は浸水が発生する。また、大雨によって発生した洪水が河川の流下能力を上回ると溢水あるいは堤防を越水して氾濫水が市街地に広がる。市街地での氾濫水の広がりを予測するためには、通常、降雨流出モデルによって河川流量を予測し、次にその流量を境界条件として河川での洪水流下を計算する河川流モデルに与える。

次に河川流が河川の流下能力を超える地点で越水が発生すると、平面二次元の氾濫流モデルに越水量を与え、市街地を流れる氾濫流の挙動を予測する。最近では、流域での降雨流出と河川での洪水流下、氾濫原での氾濫流を一体的に解くシミュレーションモデル（たとえばRainfall-Runoff-Inundation (RRI)モデル（図-5）やDioVISTA/Flood）が開発され、広く利用されている。

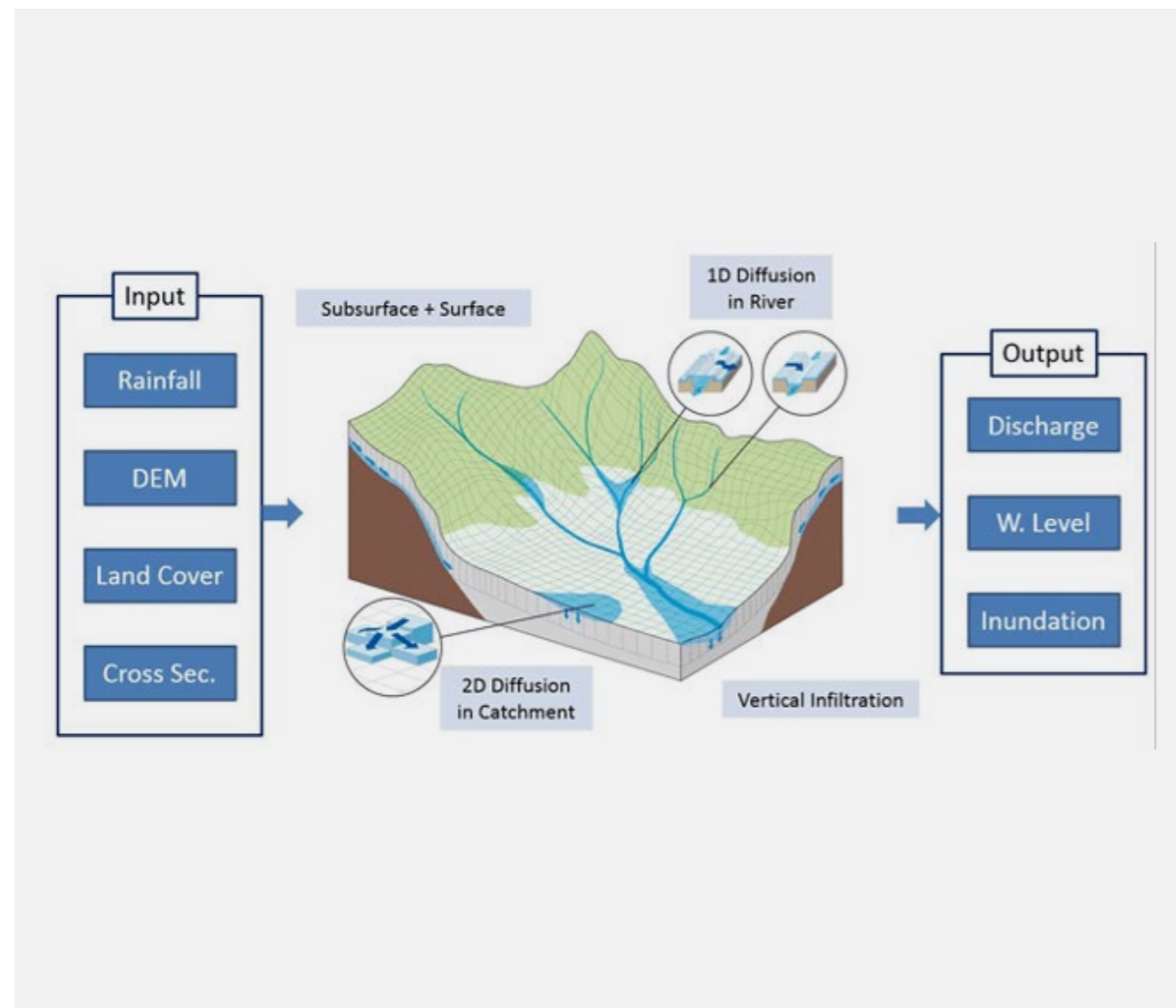


図-5 RRIモデルの構造（土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) <https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index.html>).

3.5 降雨流出モデルの役割と課題

洪水リスクを把握するための洪水予測は、再現期間が数百年を超えるような規模の洪水を予測対象とする。数百年を超える流量時系列データがあれば、その流量データを統計的に解析して再現期間200年といった稀な洪水の大きさを予測することができる。しかし、そうした観測流量データは存在しない。そのため、水文頻度解析手法を用いて計画規模の再現期間に対応する降雨時系列データを模擬的に生成し、それを降雨流出モデルに入力することによって稀な規模の高水流量の予測値を得ることが一般的に行われてきた。最近では気候予測モデルを用いて数千年に相当する長期間の気候情報データベース（たとえば「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)、Mizuta et al., 2017）が作成され、その中の降水データを用いて数百年の再現期間に対応する洪水データを予測することが可能となっている。

d4PDF (https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/index_en.html) とは、気象研究所が開発した水平解像度約60kmの全球大気モデルMRI-AGCM3.2を用いた気候予測実験と水平解像度約20kmで日本周辺域を対象とする領域気候モデルNHRCMを用いた領域実験によって作成された気候予測データセットである。全球モデル実験は過去実験、非温暖化実験、1.5°C上昇実験、2°C上昇実験、4°C上昇実験から構成され、領域モデル実験は過去実験、1.5°C上昇実験、2°C上昇実験、4°C上昇実験から構成される。極端現象の頻度と強度の変化を予測できるように、多数のアンサンブル実験が行われたことが特徴である。たとえば領域モデル実験の4°C上昇実験では、合計5400年分の気候シミュレーションデータが作成され、年最大日雨量といった極端な水文量の変化を確率分布の変化として分析することができるようになった。

これに含まれる降水データセットを用いれば、降雨流出モデルを利用して超長期間の河川流量データを生成し、稀な洪水発生を定量的に分析して水災害リスクを推定することができる。d4PDFを用いることによって地球温暖化による洪水流量の変化を年最大洪水流量等の頻度分布の変化として分析することが可能になったことは、水災害リスクの変化を予測するために極めて重要な発展である。

こうした河川流量の予測を任意の河川流域で実現し水害リスクを予測することが重要な課題である。そのためには任意の河川流域に適用できるような降雨流出モデルが必要となる。予測の蓋然性を高めるためには、物理的な基礎式から構成される降雨流出モデルを利用し、そこで使われるモデルパラメータ値をチューニングすることなく土地被覆や表層土壌、地質の物性に基づいて定めることができることが望ましい。そうした研究はこれまでも数多く行われているが、未だに解決されていない。世界中の任意の河川流域に適用できる降雨流出予測モデルの開発とモデルパラメータ値の標準値を土地被覆や表層土壌、基岩の物性から定められるような研究開発が必要である。次章以降では、これらの課題について筆者らが取り組んだ内容を、(株)東京海上研究所との共同研究を中心に紹介する。

4.

気候変動による洪水ハザードの強度・頻度の変化予測

d4PDFで作成された降水データセットを用いて、日本国内の主要流域の洪水流量を予測し、気候温暖化シナリオのもとで年最大ピーク流量といった水文極値がどのように変化する可能性があるかを分析した。

4.1.2 雨水流出過程のモデル化

河川流にはキネマティックウェーブモデル(椎葉ら、2013)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (1)$$

$$Q = \alpha_c A^m \quad (2)$$

を用いる。 t は時間、 x は距離、 A は通水断面積、 Q は流量、 q_L は流れ方向の単位長さ当たりの側方流入量、 α_c はパラメータで $\alpha_c = (1/B_c)^{2/3} \sqrt{i_c/n_c}$ は河道勾配、 n_c は河道の粗度係数、 B_c は河幅、 m は定数(=5/3)である。斜面流れでは土壌中を流れる不飽和流と表層土壌中の中間流および地表面流を考慮したキネマティックウェーブモデル

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - e \quad (3)$$

$$q(h) = \begin{cases} v_c d_c \left(\frac{h}{d_c}\right)^\beta & , 0 \leq h < d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) & , d_c \leq h < d \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d)^m & , d \leq h \end{cases} \quad (4)$$

を適用する。 h は流積、 q は単位幅の斜面流量、 r は降水強度、 e は蒸発散強度、 d_c はマトリクス部の空隙厚、 d は土壌中の全空隙厚、 α_s はパラメータで $\alpha_s = \sqrt{i_s/n_s}$ 、 i_s は斜面勾配、 n_s は等価粗度、 m は定数(=5/3)である。また、 k_c をマトリクス部の飽和透水係数、 k_a を中間流の透水係数とし、 $v_c = k_c i$ 、 $v_a = k_a i$ 、 $k_c = d_c d_s n_s k_a \beta$ とする。 i は地形勾配であり地形データによって定まる。 $d_c d_s n_s k_a \beta$ は土地被覆や表層土壌によって異なる値を取るパラメータである。

これらのパラメータ値は一般的には観測流量と計算流量とが適合するように決定する。これらの値をチューニングするのではなく、地形情報や土壌・地質情報から定め、水文観測情報の存在しない任意の河川流域に適用する手法を開発することが世界的に重要な研究課題である。

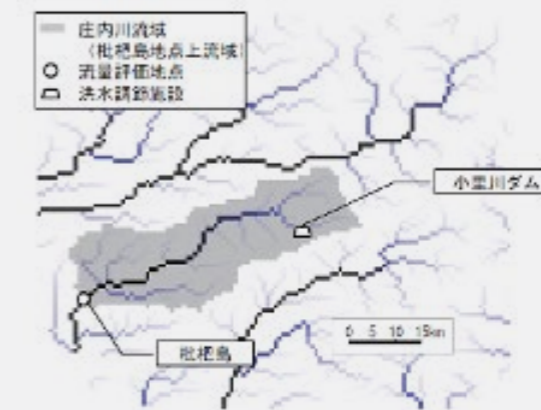
4.1.3 極値降水量・河川流量の頻度分布の将来変化の分析結果

日本国内の主要河川流域である荒川流域(2,940km²)、庄内川流域(1,010km²)、淀川流域(8,240km²)を対象とし分布型降雨流出モデル1K-DHMを構築した。対象流域の流域地形モデルを図-7に示す。アンサンブル気候予測データベース

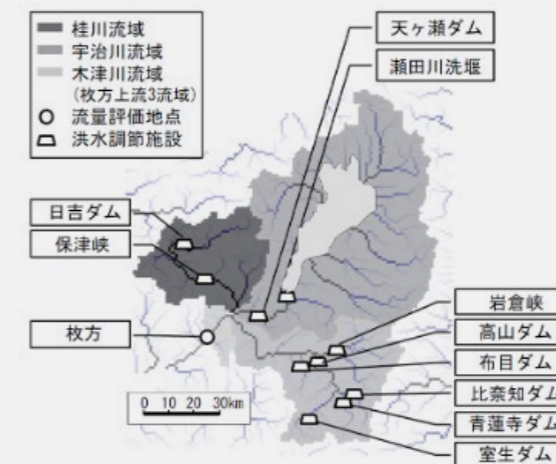
d4PDF (<https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/>)から得た降水量データは、過去実験60年分の計算を1メンバとする50アンサンブルメンバの合計3000年の毎時時系列データ、4度上昇実験60年分の計算を1メンバとする90アンサンブルメンバの合計5400年の毎時時系列データであり、それらの極値降水量の再現性を確認した。次に、地球温暖化による極値降水量の頻度分布の変化を分析した。



A) 荒川流域 (岩淵地点上流域)



B) 庄内川流域 (枇杷島地点上流域)



C) 淀川流域 (枚方上流地点)

図-7 対象流域 (立川ら (2017) より)

過去実験(3000年分)と海面温度の異なる6種類の4度上昇実験(900年分)について、24時間雨量と72時間雨量の年最大データの確率プロット(年最大値と非超過確率(左縦軸)あるいは再現期間(右縦軸)との関係)を図-8に示す。それぞれの図には観測データから得られた年最大値の確率プロットも合わせて示している。図-8の赤線は、海面温度の予測値の異なる4度上昇実験での6つの確率プロットである。4度上昇実験のいずれの確率プロットも過去実験の青色のそれよりも右側にあり、海面

温度の違いによらず地球温暖化によって極値降水量が増加する結果となった。再現期間200年の年最大降水量は、4度上昇実験の値が過去実験の1.2~1.4倍に増加する。また、4度上昇実験の再現期間200年の年最大降水量と過去実験の900年確率年最大降水量とがほぼ同じ値となった。これは現在の最大クラス規模で通常は起こりえないと考えられる値が、4度上昇時には再現期間200年の治水計画レベルにまで頻度が増加することを示しており、留意すべき結果と考える。

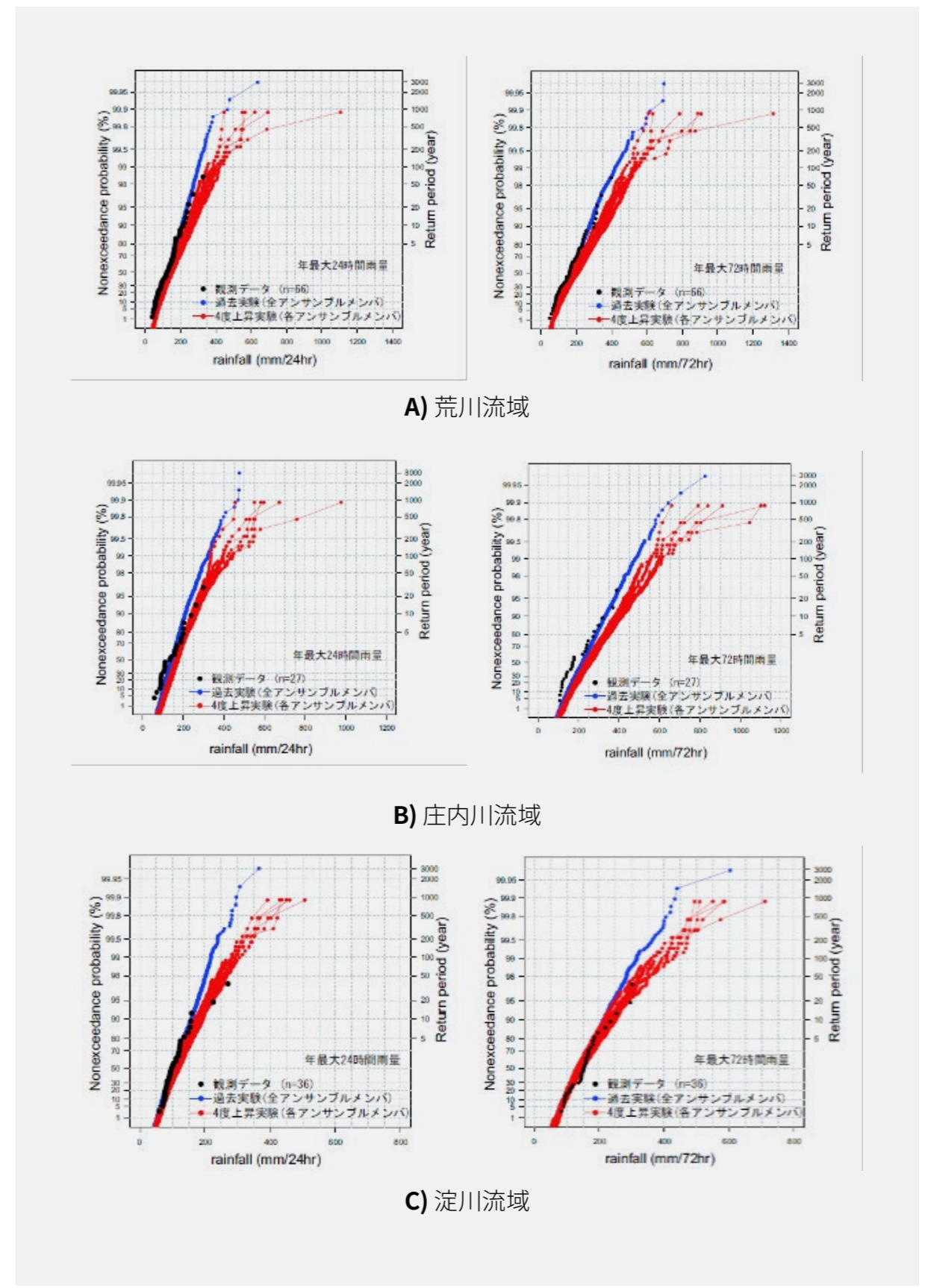
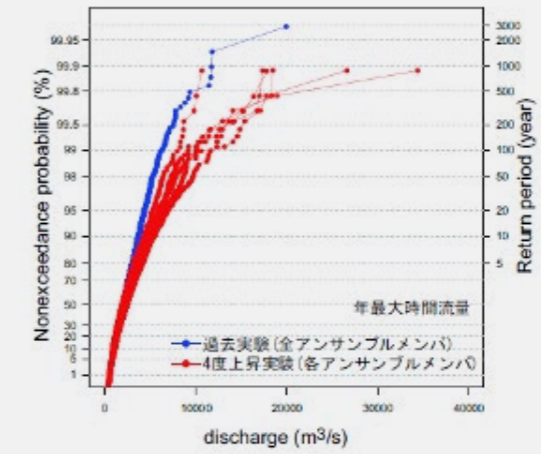


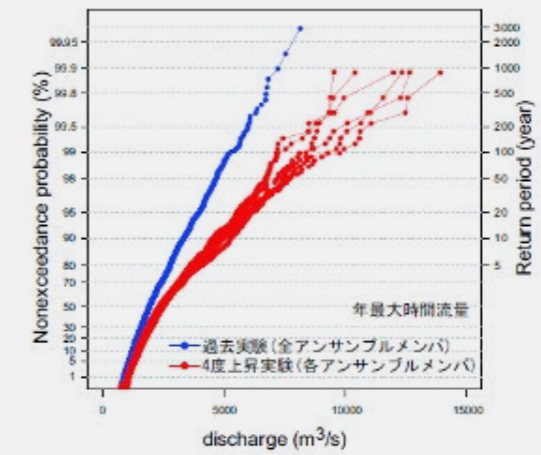
図-8 各流域の年最大24時間降水量(左)と年最大72時間降雨量(右)の頻度分布図。黒点は観測降雨、青線は過去実験、赤線は4度上昇実験(SST設定ごとの確率プロット)を示す(立川ら(2017)より)。

これらの雨量データを用いて降雨流出計算を実施し、過去実験3000年、4度上昇実験5400年分の年最大時間流量データを得た。それらを用いて作成した年最大流量の確率プロットを図-9に示す。4度上昇実験の年最大確率流量は、どの海水温分布パターンでも過去実験よりも大きくなり、非超過確率が大きくなるほど増加率は大きくなることわかった。過去実験と4度上昇実験とで再現期間200年の年最大流量を比較すると三流域とも1.5倍から1.7倍の増加となった。年最大降水量でのそれらの増加率は

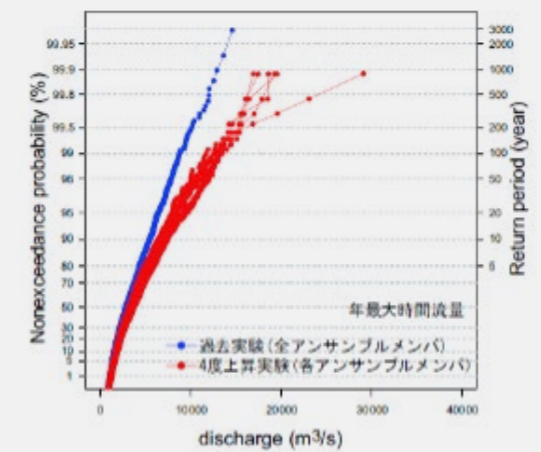
は1.2から1.4倍であり、年最大流量の増加率はそれよりも大きい。一般に降雨強度が大きくなれば、ある値を境に洪水ピーク流量はより大きな増加率を示す。降雨流出モデルに内在する実際の降雨流出現象の非線形性が表れて、年最大流量の増加率は年最大降水量の増加率を上回ったものと考えられる。また、4度上昇実験での200年確率年最大流量は過去実験の900年確率年最大流量よりも大きくなった。この発見は、将来の治水計画を定める確率流量を考える上で留意すべき結果である。



A) 荒川流域 (岩淵地点)



B) 庄内川流域 (枇杷島地点)



C) 淀川流域 (枚方地点)

図-9 各流域の年最大時間流量の頻度分布図。青線は過去実験、赤線は4度上昇実験（海水表面温度の異なりシナリオデータ）の確率プロットを示す（立川ら（2017）より）。

4.1.4 まとめと考察

d4PDFの降水データを入力とし、分布型降雨流出モデルを介して推定した年最大時間流量の確率分布の変化を分析した。対象とした三流域で以下の結果を得た。

1) 観測値とd4PDF 過去実験から得られる年最大24時間降水量の頻度分布は非超過確率0.95以下ではよく対応した。

2) 4度上昇実験の200年確率年最大24時間降水量は、三流域とも過去実験のその1.3~1.4倍、年最大時間流量では1.5~1.7倍となった。年最大24時間雨量よりも増加率が大きくなったのは、降雨流出モデルによって表現される実際の降雨流出現象の非線形性が現れた結果と考えられる。

3) 4度上昇実験の200年確率年最大降水量と過去実験の900年確率年最大降水量とがほぼ同じ値となった。現在の最大クラス規模と考えられる値が、この地球温暖化シナリオでは将来気候の再現期間200年の年最大値に相当することを示しており、留意すべき結果と考える。

4.2 日本全国の一級水系109河川における年最大ピーク流量の変化

上述の研究の対象領域を日本全国一級水系109河川に広げて、流量極値の変化を定量的に分析した(小林ら、2020)。その際にすべての水系で主要なダムを1K-DHMに導入し、人為的な流水制御を流れのモデルに反映させて既往洪水を再現する降雨流出モデルを構築した。また、気象庁が提供する解析雨量を用いてd4PDFから得られる年最大雨量のバイアスを補正し、補正した雨量データを用いて極値流量の将来変化を推定した。

4.2.1 分析手法

降雨流出モデル1K-DHMを全国の一級河川に適用し、集水面積が流域面積の5%以上となる主要なダムを1K-DHMに導入した。モデルパラメータ値は2000年以降の既往最大洪水の観測流量を用いて河川流域ごとに同定した。その結果、ダム貯水池による洪水制御の効果を含めて全水系でNash係数(Nash and Sutcliffe, 1970) 0.7以上、ピーク流量誤差率20%以下となるパラメータ値を得た。Nash係数とは降雨流出モデルによる観測流量の再現性を示す指標としてよく使われる指標であり、次式で計算される。

$$N_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I (Q_i^{obs} - Q_i^c)^2}{\sum_{i=1}^I (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I Q_i^{obs} \quad (5)$$

上式の Q_i は Q_i^{obs} は時刻 i の計算流量と観測流量を表す。 I は対象洪水の時間数である。この指標が1.0のとき、評価対象とする流量観測地点のモデル計算値と観測値とが完全一致することを表し、1.0に近いほど再現精度が高いことを表す。一般的にこの指標が0.7以上の場合、シミュレーションモデルの再現性が高いと判断される。同規模の洪水事例に対してモデルを検証した結果、約8割の水系でNash指標0.7以上、約7割の水系でピーク誤差率25%以下となった。

4.2.2 全国一級水系109河川の年最大流量の頻度分布の将来変化の分析結果

各水系で降雨流出計算を通して得られた過去実験3,000年分、4度上昇実験5,400年分の年最大流量データを用いて、Weibull公式を用いて各水系の河川整備基本方針で定められる計画規模の再現期間に対応する流量を求めた。以後、この流量値を計画規

模計算流量とよぶ。図-10に一級水系109河川の計画高水流量とd4PDF 過去実験の計画規模計算流量との散布図を示す。両者は計算方法や計算に用いた降雨データが異なることから厳密に一致するものではないが、よい対応が見られた。d4PDF過去実験データを用いて得られた降雨流出計算結果の合理性を示すものと考えられる

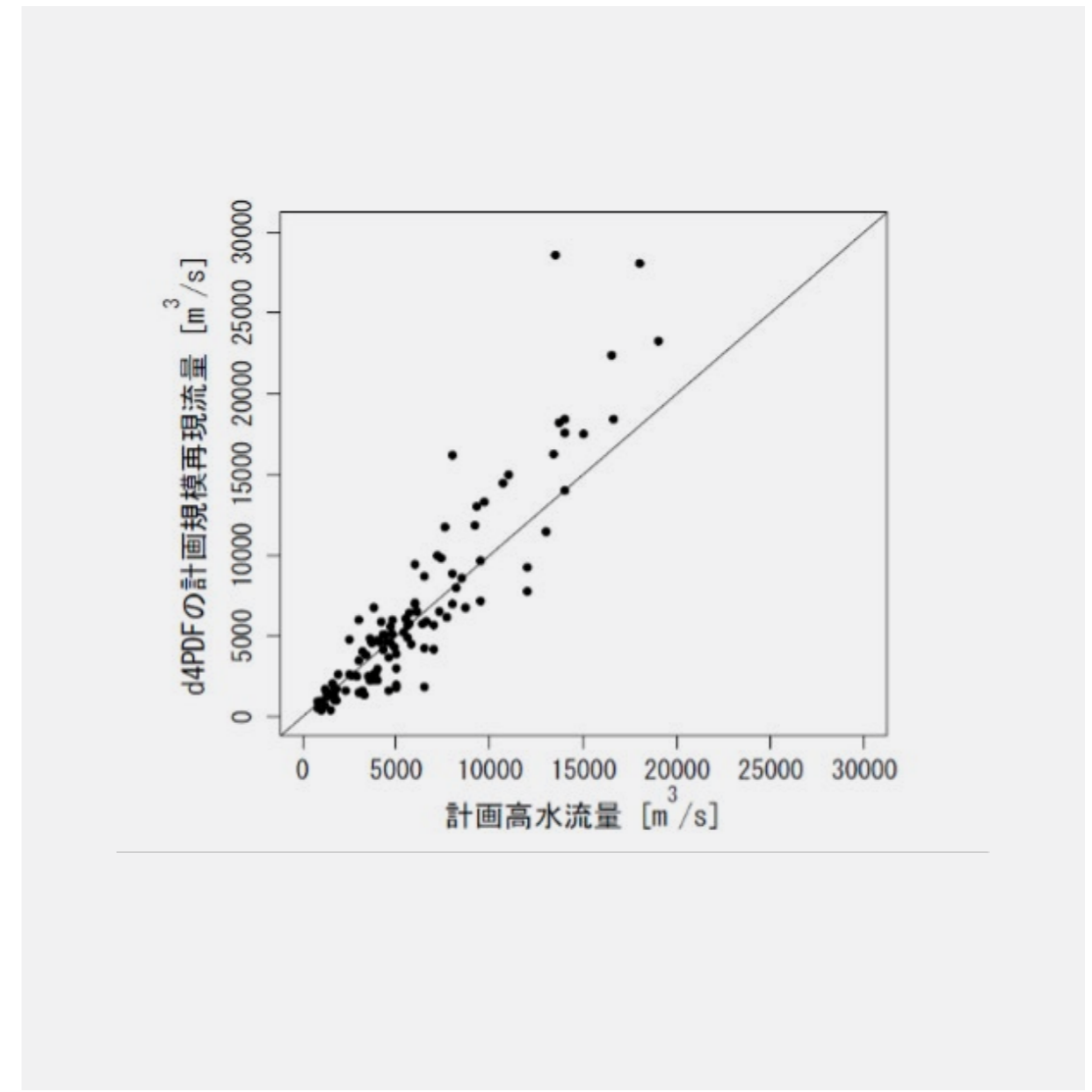


図-10 計画高水流量と計画対象の再現期間に対応するd4PDF過去実験の計算流量の比較(小林ら(2020)より)。

計画規模として多数の流域で用いられる再現期間100年に対応する年最大流量を算定し、過去実験に対する4度上昇実験での増加率を各水系で算出して図-11に示すようにその地域差を確認した。4度上昇実験では6種類の海面水温予測アンサンブルデータ（以下、SSTアンサンブル）がある。SSTアンサンブル間での100年確率流量の増加率の平均値は、もっとも小さい水系で1.11、最大で2.32となった。全水系で増加率は1.0を超えており、全水系で計画規模程度の再現期間の流量が増加する結果となった。

特に北海道地方および東北地方では増加率が高い。SSTアンサンブル間の増加率のばらつきは増加率の平均値に対応しており、北に位置する流域ほど大きいことがわかった。

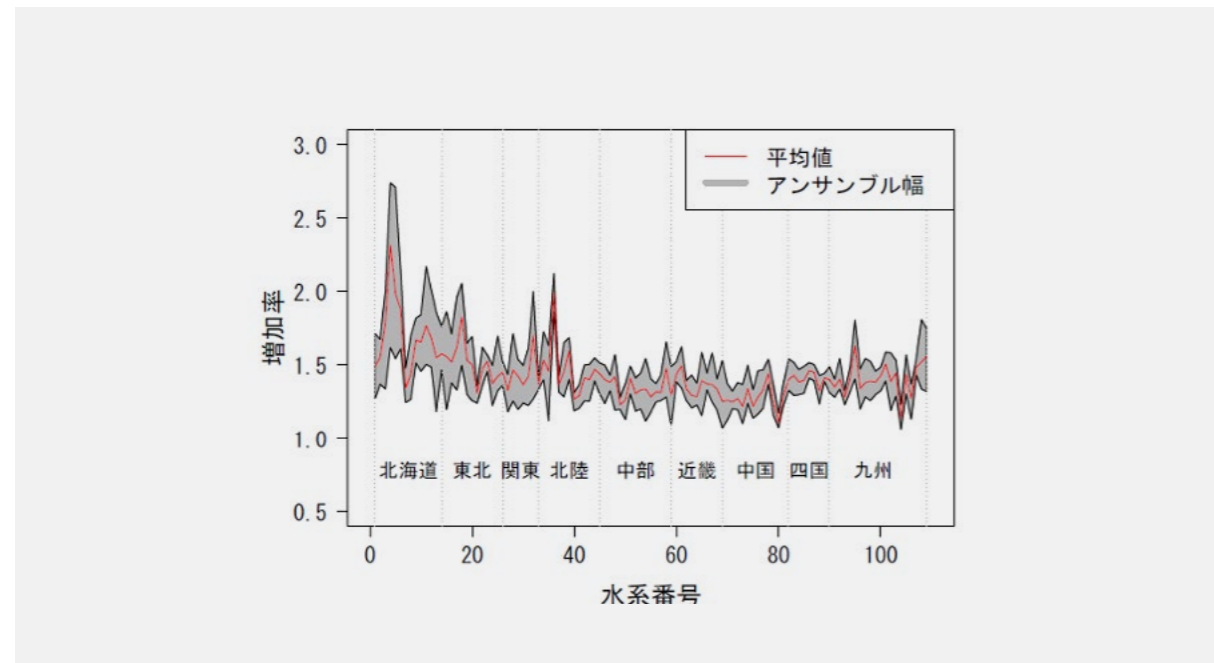


図-11 再現期間100年の洪水流量のd4PDF過去実験に対する4度上昇実験の増加率。赤線は過去実験と4度上昇実験間の増加率の平均値を表し、SST分布の違いによるばらつきを灰色で示している（小林ら（2020）より）。

各水系の河川整備基本方針で設定されている計画規模に対応する再現期間とd4PDF過去実験の計画規模計算流量に対応する4度上昇実験での再現期間のマップを図-12に示す。現在の計画規模に対応する再現期間は100年から200年の間にあるが、4度上昇実験では同じ規模の洪水がどの水系でも60年未満の再現期間で生じる

結果となった。4度上昇実験での再現期間の違いはおおむね計画規模の再現期間に対応しており、計画規模の再現期間が200年の水系では30～60年、150年の水系では30～45年、100年の水系では30年以下に低下し、中には15年以下となる水系も存在した。

4.2.3 まとめと考察

d4PDFの過去実験および4度上昇実験の降水データに対してバイアス補正を施し、補正した雨量を1K-DHMに入力して全国の一級水系109河川を対象として極値流量を計算した。d4PDF過去実験を用いて算定し

た計画規模の流量は計画高水流量と整合し、1K-DHMの適合性を確認した。4度上昇実験を用いた計算結果では、すべての水系で100年確率流量は増加し、特に北海道、東北、北信越、九州地方南部で高い増加率を示すことがわかった。

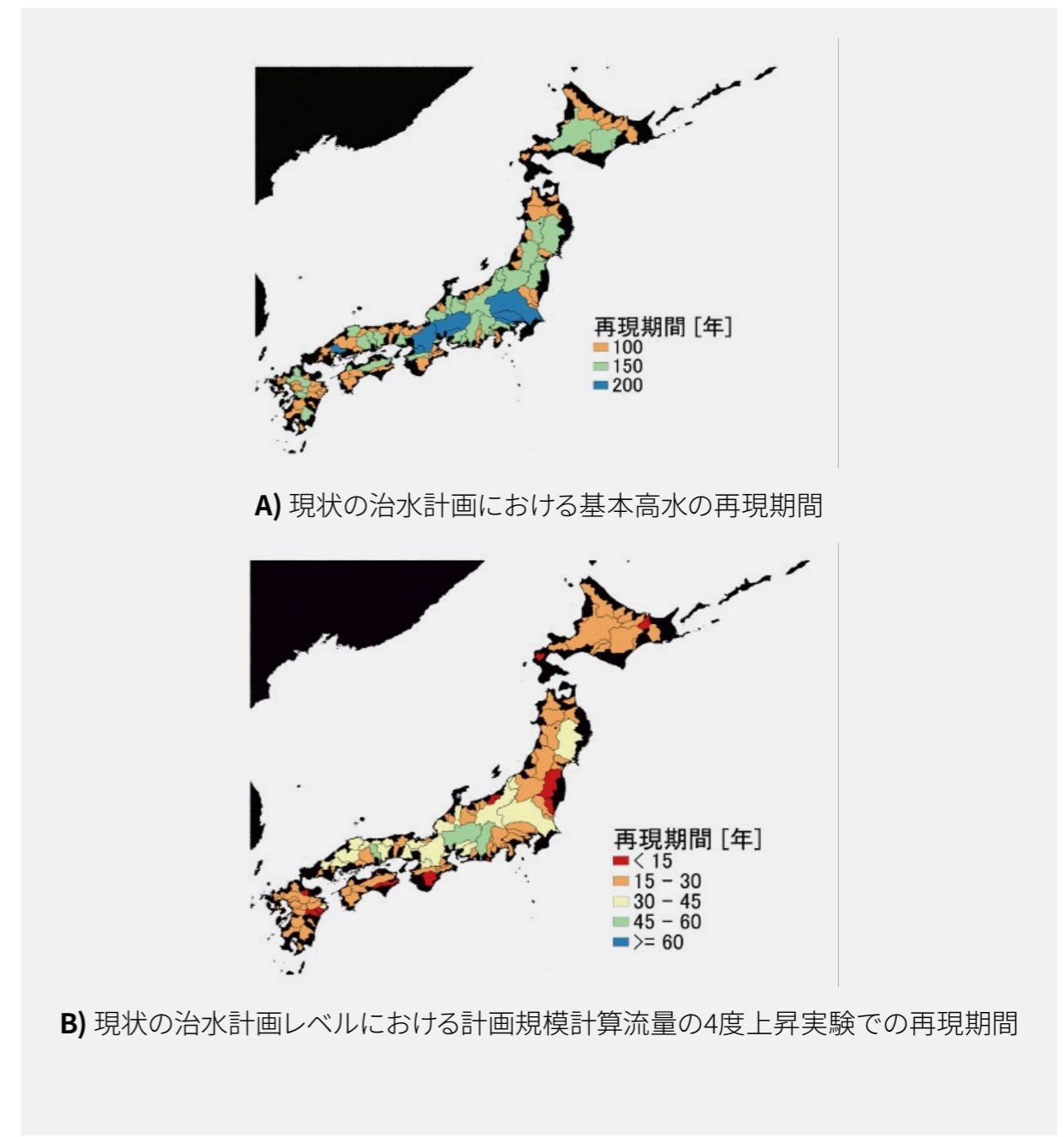


図-12 現状の治水計画での再現期間（上）とd4PDF過去実験での計画規模計算流量に対応する4度上昇実験での再現期間（下）。（小林ら（2020））。

4.3 d4PDFを使用したベトナム・紅河の極値流量の将来変化予測

我が国だけでなく他国で発生する自然災害も我が国の経済に大きな影響を及ぼす。特に東南アジア域は多くの日系企業が進出し、それらの国々の工業団地が生産拠点となっている。そうした地域での水災害リスクを推定するために、ベトナムの紅河を対象として分布型降雨流出モデル1K-DHMを適用し、d4PDFの降水データを用いて当該流域の河川流量を推定した。

次に、ハノイ周辺のソントイ地点における年最大流量の将来変化を予測し、現在の整備水準と考えられる1971年洪水規模の河川流量の現在および将来での発生頻度を分析し、当該流域の洪水リスクが増加することを明らかにした(加藤ら、2020)。

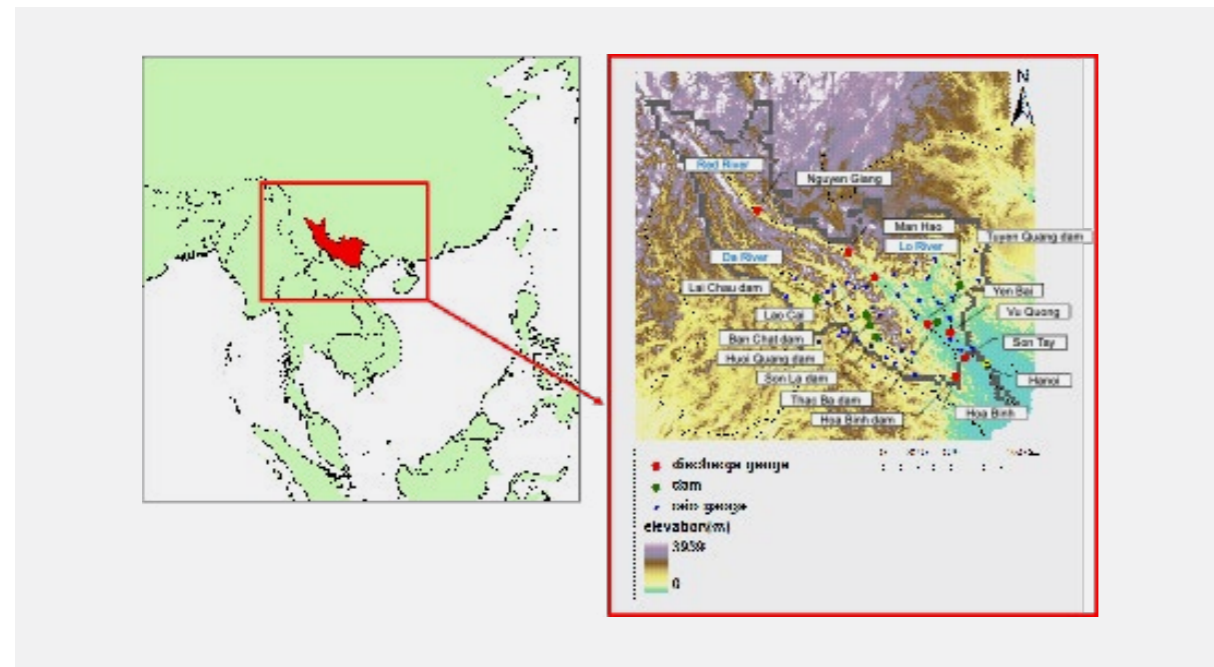


図-13 紅河の流域図(加藤ら(2020)より)

4.3.1 流域概要

紅河はヒマラヤ山脈の東端を發し中国とベトナムを流れる国際河川である。流域面積は168,700km²であり、日本の最大流域の利根川の約10倍に相当する。ソントイ地点の上流でダ川、口川と合流してハノイ市を經由してトンキン湾に注ぐ。図-13に流域図を示す。下流部の紅河デルタは亜熱帯性気候であり、平均降水量は約1,700mmである。

5月から9月は雨期で台風による洪水被害を受けることもある。観測データが存在する中での最大洪水は1971年の台風によって発生した洪水であり、その時のソントイ地点の最大流量は37,400m³/sと報告されている。この洪水後にはハノイ首都圏防備を基礎とした洪水対策が進められ、ソントイ地点の現在の流下能力は30,000m³/s程度と推定される。

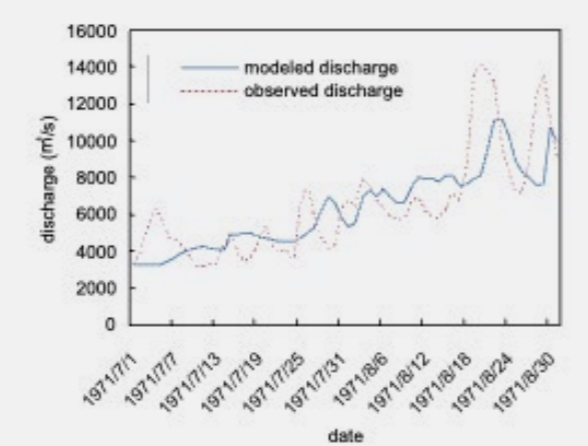
4.3.2 分析手法

紅河全流域を対象として10km解像度の分布型降雨流出モデル1K-DHMを構築し、SCE-UA法(Duan et al., 1994)を用いてパラメータを同定してd4PDFの降水データを用いて河川流量を予測した。観測降水データはベトナム域では雨量計データ、中国域ではAPHRODITEモンスーンアジア域降水データセット(APHRODITE-MA, <http://aphrodite.st.hirosaki-u.ac.jp/products.html>)を利用した。モデルパラメータ同定には多くの観測地点で得られた水文データを用いた。水収支の観点から妥当と考えられる2002年の洪水を対象とし、4.1(2)に示すパラメータ $d_c, d_s, n_s, k_a, \beta$ と河道の等価粗度 n_c を同定した(表-1(左))。

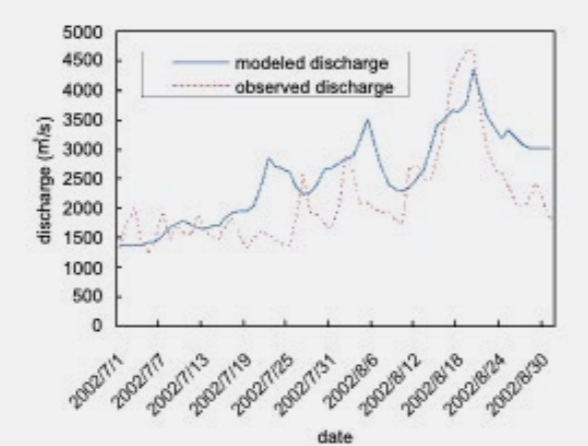
一般に大陸の大河川では日本の河川流域よりも流域面積が広く、流下時間が数か月に渡るため、河川流量の予測には蒸発量を考慮する必要がある。蒸発散量の観測値は存在しないため、河川流量の再現性が高い値として年間蒸発量900mmを設定し(表-1(右))、時間単位で蒸発量を降水量から差し引いて入力データとした。年間蒸発量900mmは、この地域の気候として物理的に妥当な値と考えられる。また、1K-DHMが採用している降雨流出機構は、土壌が乾燥した勾配の緩やかな流域に適用することが難しいため、対象期間を洪水期間に限って適用した。Hoa Binh地点、Yen Bai地点、Vu Quang地点の3地点における河川流量の再現結果を図-14に示す。河川流量の時間変化とピーク流量を概ね再現することができた。

表-1 同定されたモデルパラメータの値(左)と年間蒸発散量の違いによる再現性の評価(右)(加藤ら(2020)より)。

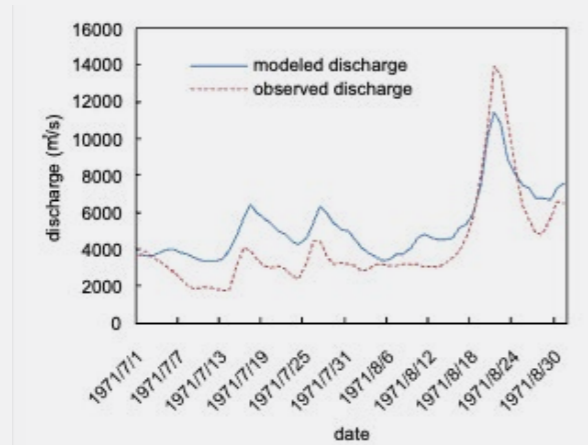
| パラメータ | 値 | 年間蒸発量 (mm) | Nash 係数 |
|---|------|------------|---------|
| 斜面部のマンニングの粗度係数 n_s (m ^{-1/3} /s) | 0.01 | 950 | 0.7542 |
| 大空隙部の透水係数 k_a (m/s) | 0.01 | 900 | 0.7552 |
| 土壌中の全空隙厚 d (m) | 1.69 | 850 | 0.7547 |
| マトリックス部の空隙厚 d_c (m) | 1.00 | 800 | 0.7529 |
| 透水係数に関するパラメータ β (-) | 2.80 | 750 | 0.7497 |
| 河道のマンニングの粗度係数 n_c (m ^{-1/3} /s) | 0.03 | 700 | 0.7452 |



(a) Hoa Binh



(b) Yen Bai



(c) Vu Quang

図-14 (a) Hoa Binh, (b) Yen Bai, (c) Vu Quang地点における河川流量の再現性 (加藤ら (2020) より)。

4.3.3 年最大流量の頻度分布の将来変化の分析結果

d4PDFの降水データを用いて河川流量を算出し、年最大流量の頻度分布を得ることで将来変化を推定した。流域にもたらされる降水は15日程度でSon Tay地点に到達することが確認できたため、d4PDF過去実験と4度上昇実験の年最大15日間雨量の頻度分布を整理した。その結果を図-15に示す。d4PDFの過去実験の頻度分布は観測データ (APHRODITE-MA) によるものとよく一致し、同じ発生頻度では4度上昇実験の年最大15日降水量が増加することがわかった。

d4PDF降水データの過去実験6000年分、4度上昇実験5400年分を1K-DHMに入力し流出計算を行った。Son Tay地点での年最大流量の頻度分布を図-16に示す。過去実験はダムによる流量制御を反映せずに算出した結果である。4°C上昇実験では全ての再現期間において流量が増加する。

この分析結果から既往最大の1971年の洪水の再現期間は6000年程度であることがわかり、現在気候下では最大クラスの規模であったことが確認できた。一方で、この洪水の4°C上昇実験での再現期間はダム操作を考慮して600年程度にまで減少し、地球温暖化による大洪水の頻度の増加が懸念される結果となった。Son Tay付近における現在の流下能力30,000m³/sに対応する再現期間は4°C上昇実験では300年程度である。現在は十分な治水対策がなされているといえるが、地球温暖化によって越水や破堤の可能性が高まることがわかった。

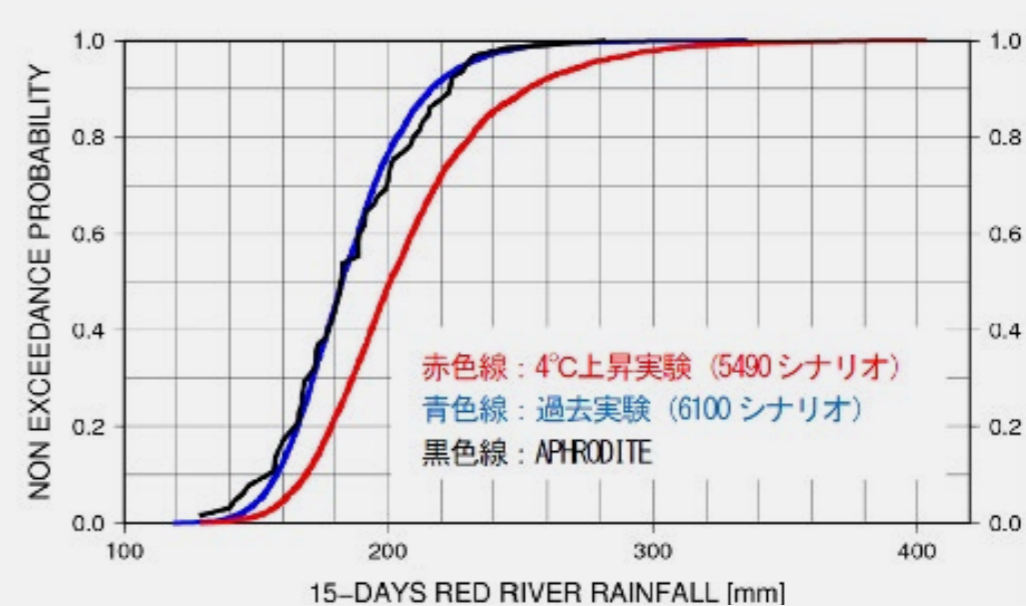


図-15 年最大15日間流域平均雨量の頻度分布のd4PDFとAPHRODITEの比較 (加藤ら (2020) より)。

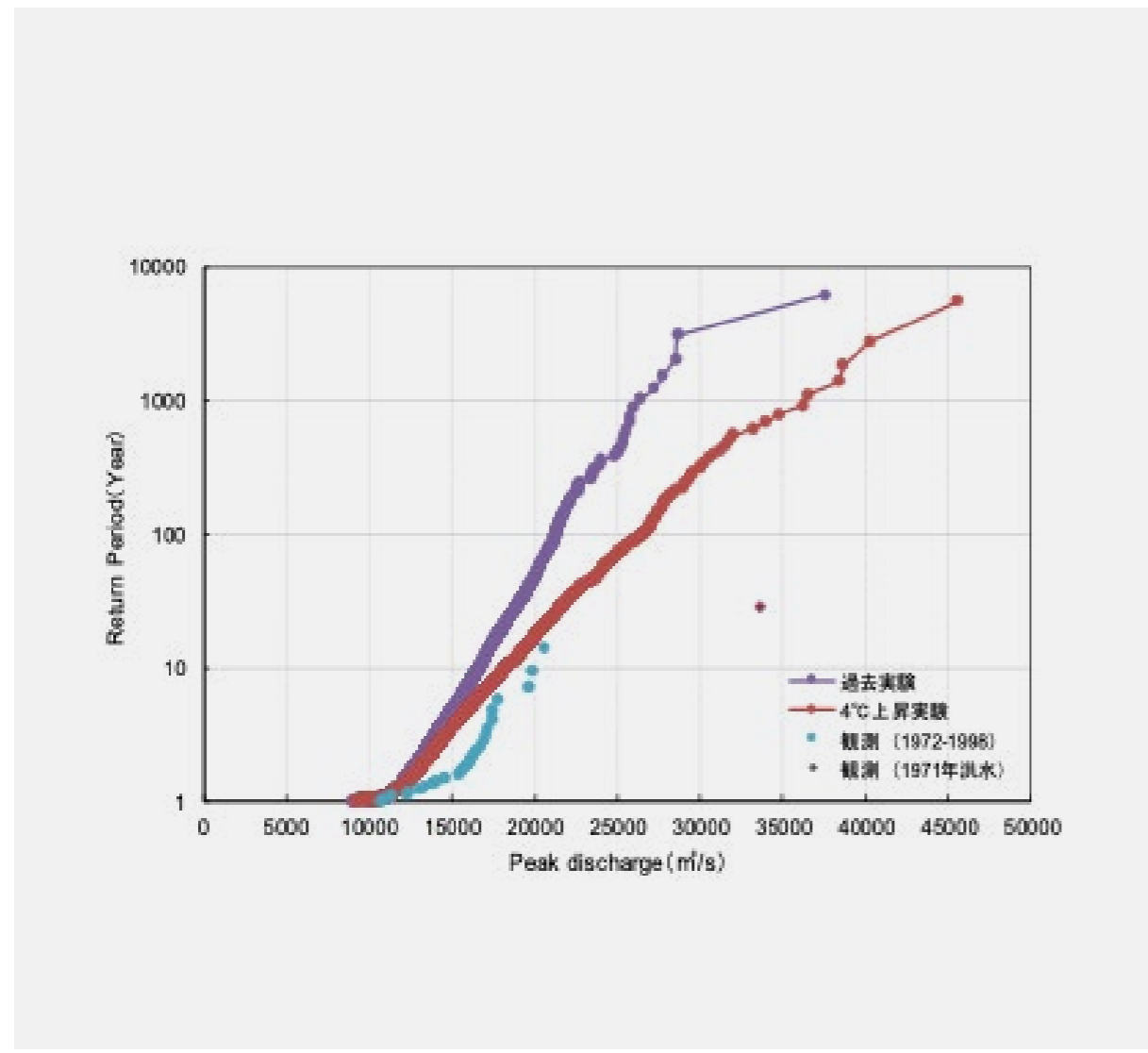


図-16 Son Tay地点での年最大流量の頻度分布(加藤ら(2020)より)。

4.3.4 まとめと考察

d4PDFの過去実験は洪水の流下時間に対応する15日間流域平均降水の頻度分布をよく再現し、4度上昇実験では年最大15日降水量が増加することがわかった。河川流量についても4°C上昇実験による年最大流量が増加することがわかった。既往最大の1971年の洪水は、現在気候下では最大クラスの規模であるが、将来気候下では再現期間600年程度となりSon Tay付近における現在の流下能力30,000m³/sに対応する再現期間は4°C上昇実験では300年程度にまで減少する可能性があることがわかった。

4.4 d4PDFを使用したタイ・チャオプラヤ川の極値流量の将来変化予測

タイ国チャオプラヤ川流域を対象として流域特性に対応した降雨流出モデルを構築し、バイアス補正を施したd4PDFの降雨データを入力データとして極値流量の将来変化を予測した。まず降雨流出モデルが既往洪水を再現すること、モデル算出値に基づく基準地点(ナコンサワン、C2地点)の年最大流量の頻度分布が流量観測値と整合することを確認した。次に計算結果にバイアス補正を導入してC2地点の年最大流量およびC2地点で2,000m³/sを超える積算洪水量の将来変化を分析した。後者はバンコク周辺で大規模な洪水氾濫が発生するときの指標であり、リスク評価の観点では氾濫水量の多寡が重要となるためである。その結果、地球温暖化によってチャオプラヤ川流域の洪水リスクが増加することを明らかにした(加藤ら、2022)。

4.4.1 流域概要

チャオプラヤ川は流域面積約163,000 km²のタイ最大の河川であり、日本最大流域の利根川の約10倍に相当する。北部の山岳地域からPing川、Wang川、Yom川、Nan川の4河川がナコンサワン地点で合流してチャオプラヤ川となり、アユタヤ、バンコクを流れてタイ湾に注ぐ。図17に流域図を示す。流域平均の年降水量は約1,200 mmであり、蒸発量は1000 mm程度であって、降雨の20%程度が河川流出量となる。雨季と乾季が明瞭に分かれ、5月から10月が雨季となる。

4.4.2 分析手法

チャオプラヤ川流域を対象として10km解像度の分布型降雨流出モデル1K-DHMを構築し、SCE-UA法を用いてパラメータを同定してd4PDFを用いて河川流量を予測した。チャオプラヤ川中流域での氾濫による下流の流量の減少やピーク時刻の遅れを表現するため、氾濫が発生しやすいナコンサワン地点の上流域に線形貯水池モデルを導入した。また、チャオプラヤ川上流に存在する2つの大規模ダムは、ルールカーブおよび過去の季節別の実績放流量に基づいてモデル化した。入力降水データには雨量計観測データを主として使用し、APHRODITEモンスーンアジア域降水データセットで補完した。

蒸発散量はd4PDFの蒸発散量データを利用した。年間の水収支に適合するように毎時の蒸発散量データに係数を乗じた後、降水データから差し引いて1K-DHMに入力した。また、1K-DHMのモデル特性から土壌水分の高い時期から計算を開始する必要があるため、年積算降水量が700 mmに到達した時点以降を計算対象とした。同定したモデルパラメータの値を表-2に、それを用いた2011年の大洪水のプミボンダム流入量の再現結果を図-18に示す。Nash係数は0.65であり、ハイドログラフの形状とピーク流量を概ね再現することができた。

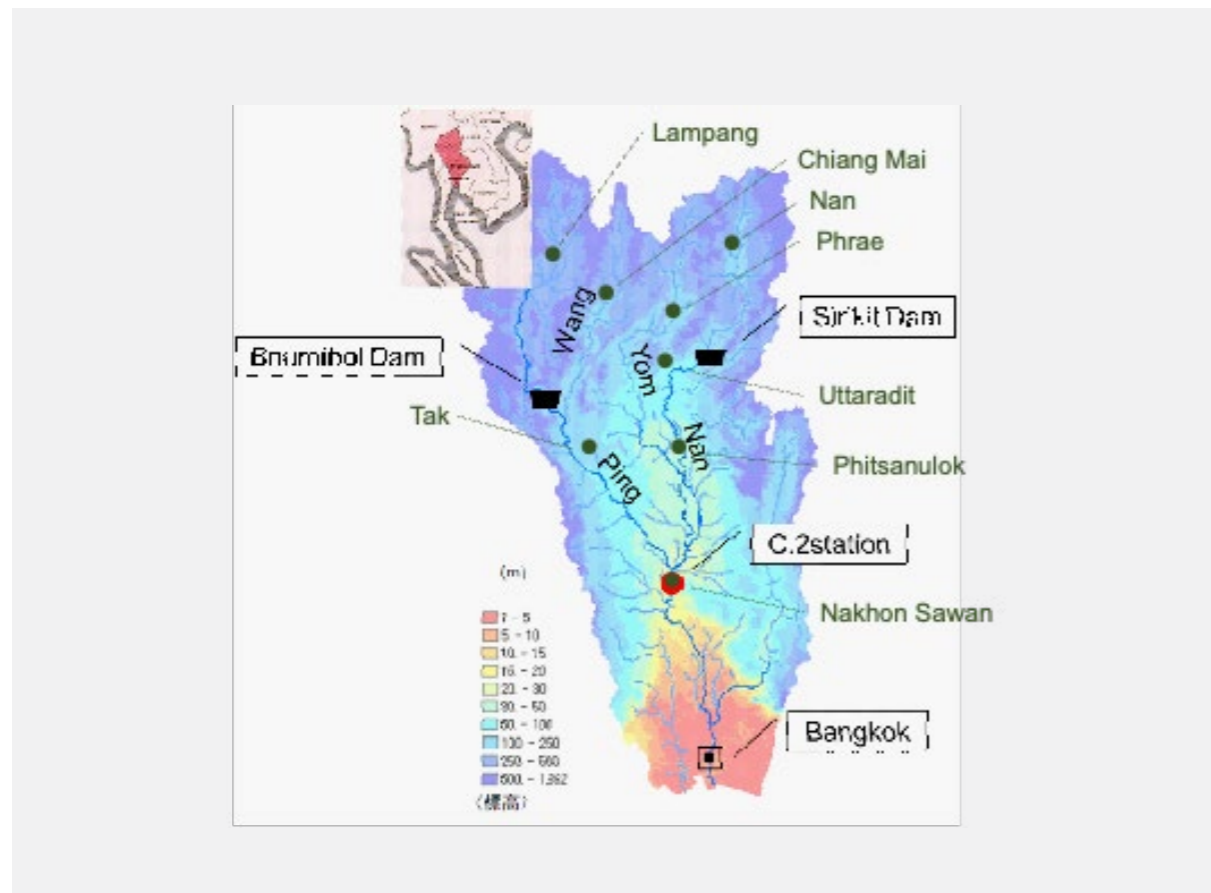


図-17 チャオプラヤ川流域図 (加藤ら (2022) より)。

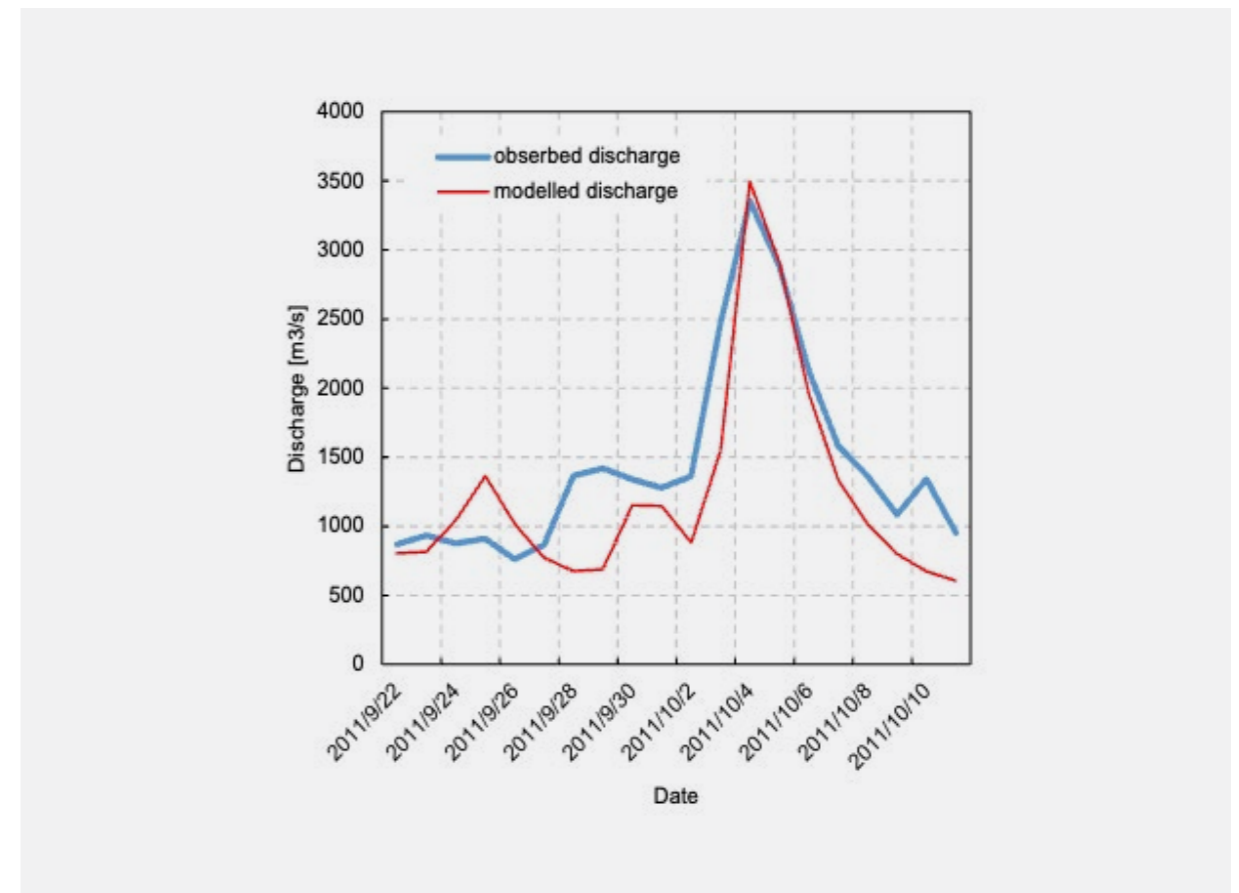


図-18 プミポンダム流入量の再現性 (加藤ら (2022) より)。

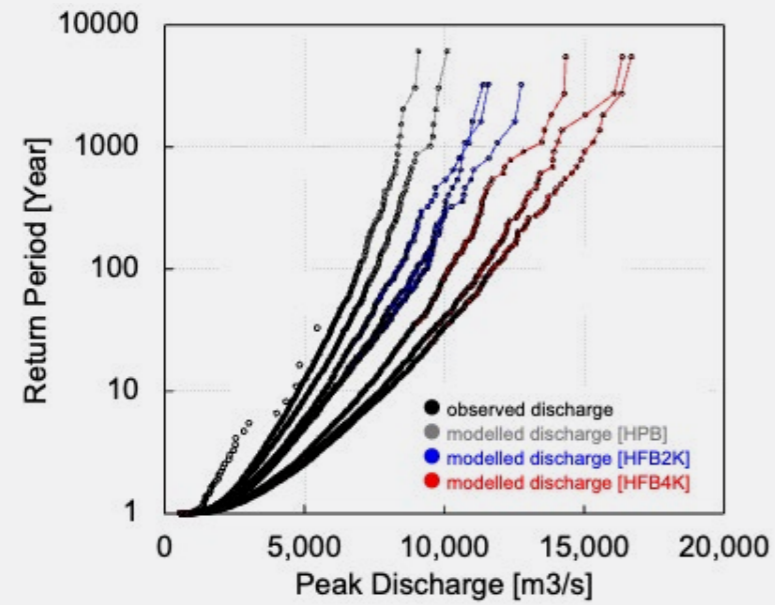
表-2 同定されたパラメータの値

| パラメータ | 値 |
|----------------|---|
| 斜面部のマンニングの粗度係数 | $n_s \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ 1.09×10 ⁻² |
| 大空隙部の透水係数 | $k_s \text{ (m/s)}$ 7.17×10 ⁻³ |
| 土壌中の全空隙厚 | $d \text{ (m)}$ 0.58 |
| マトリックス部の空隙厚 | $d_c \text{ (m)}$ 0.25 |
| 透水係数に関するパラメータ | $\beta \text{ (-)}$ 8.28 |
| 河道のマンニングの粗度係数 | $n_c \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ 0.02 |

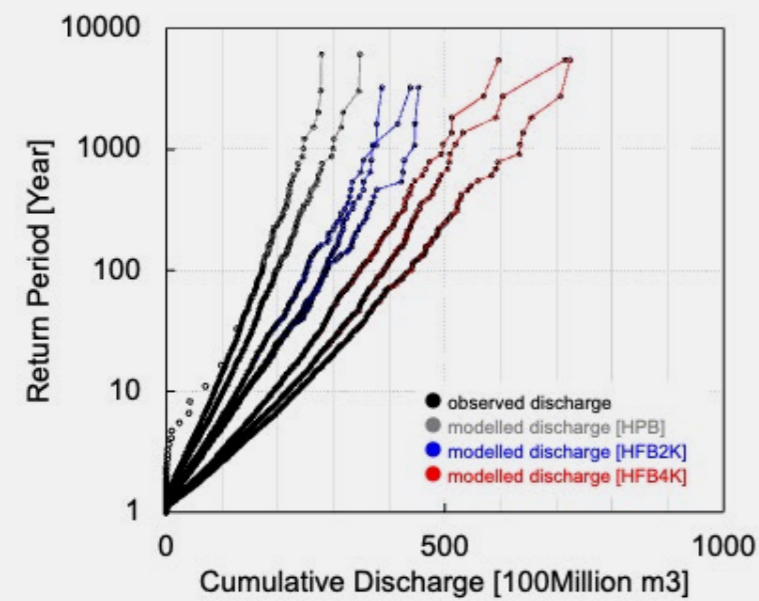
4.4.3 年最大流量の将来変化の分析結果

d4PDFの降水量データと観測データの統計的特性に差異が見られたため、月ごとにクオンタイルマッピング法を用いてバイアスを補正した降水量、過去実験6000年分、2度上昇実験3240年分、4度上昇実験5400年分を作成した。次に、それらの値を1K-DHMに入力して流量計算を実施した。C2地点における年最大流量と2,000m³/s超過積算量の将来変化を図-19に示す。流量観測値と過去実験の計算値を比較すると、年最大流量、2,000m³/s超過積算量ともに既往洪水とよく整合した。

2度上昇実験、4度上昇実験ともに、同じ再現期間では過去実験の値を上回る結果となった。再現期間100年に相当する流量の将来変化をみると、年最大流量は、過去実験から2度上昇実験で1.20倍～1.35倍、過去実験から4度上昇実験で1.55倍～1.63倍、2度上昇実験から4度上昇実験では1.21倍～1.30倍となり、気温の上昇に伴い流量が顕著に増加することがわかった。2,000m³/s超過積算量ではさらに大きな変化が見られ、過去実験から2度上昇実験で1.44倍～1.67倍、過去実験から4度上昇実験で2.23倍～2.27倍、2度上昇実験から4度上昇実験では1.36倍～1.55倍となり、地球温暖化によって越水や破堤の可能性の頻度が高まることがわかった。



A) 年最大流量の将来変化



B) 2,000 m3/s 超過積算量

図-19 ナコンサワン (C2) 地点での年最大流量の頻度分布。過去実験、2度上昇実験、4度上昇実験の違いを示す。降水量に異なるバイアス補正手法を用いた結果を合わせて示す (加藤ら (2022) より)。

4.4.4 まとめと考察

d4PDFの降水量データにバイアス補正を施し、流量計算を実施した。チャオプラヤ川流域においては、気候変動に伴い年最大流量と2,000 m³/sを超える積算流量が顕著に増加することがわかった。再現期間100年に相当する過去実験と2°C上昇実験の変

化率は、年最大流量で1.20~1.35倍、2,000 m³/s超過積算量で1.44~1.67倍となる。過去実験と4°C上昇実験の変化率は、年最大流量で1.55~1.63倍、2,000 m³/s超過積算量で2.23~2.27倍となって、洪水リスクが増大することがわかった。



5. 河川流量の予測手法の高精度化の試み

降雨流出モデルはモデルの動作を決めるモデルパラメータを持つ。その値は地形や土地被覆、表層土壌、地質に関する情報のみから定量的に定めることが難しく、前章で示した分析例では、計算結果である予測流量と観測流量とが近い値となるようにモデルパラメータ値を同定した。水文観測情報が存在する地点は限られるため、通常はその地点よりも上流域は同じ値のモデルパラメータ値をとるとして最適同定する。一方で、上述した分布型降雨流出モデル1K-DHMは空間的に分布する土地被覆や表層土壌、地質の情報をもとに、モデルパラメータ値を定めることが原理的に可能である。ただし、それらの値を現地で取得した土壌サンプルから定めることは容易ではない。現地でサンプルした土壌パラメータの値は取得したその地点の土壌に対する値であり、その土壌タイプ全体を代表するパラメータ値を土壌サンプルから定めることができない。

同じ表層土壌といってもその特性は空間的にばらつくことや、土壌サンプルでは測定できない大空隙の存在が土層内の流れを支配することが、その原因として考えられる。そのため、空間的に分布する土地被覆や土壌の情報に応じて、ある広がりの中で土層内を流れる雨水の平均的な挙動を表現する

平均的なパラメータ値を求める手法の開発が重要な課題となる。それができれば、土地被覆や表層土壌の特徴に応じて代表的なパラメータ値を得ることができ、水文観測情報がない任意地点の河川流量予測の可能性を広げるからであり。この章ではこうした課題に取り組んだ研究を紹介する。

5.1 土地被覆情報を反映した分布型降雨流出モデルのパラメータ同定

通常モデルパラメータ同定では、ある流量観測地点の上流域に含まれる複数の土地被覆や表層土壌の空間分布を考慮してそれぞれのパラメータ値を同定することは難しい。そのため、上流域の土地被覆がほぼ同じあるような観測地点を選択して、そこに含まれる土地被覆に対応するモデルパラメータの値を同定することが考えられる。しかし、こうした観測地点は限定され、様々な土地被覆のパラメータ値を同定するとは困難である。そこで、分布型降雨流出モデル1K-DHMを対象とし、複数の土地被覆や表層土壌のモデルパラメータ値を一度に同定する手法を開発した(加藤ら、2024)。

5.1.1 分析手法

SCE-UA法を用いる際に、多地点・複数の洪水事例用いてモデルパラメータ値の最適同定計算を実現する目的関数を考案し、異なる土地被覆のモデルパラメータ値を一度に同定する手法を開発した。同定計算にはSCE-UA法を用いた。SCE-UA法は大域的探索法の一つであり降雨流出モデルのパラメータ同定によく用いられる。降雨流出モデルによる観測流量の再現性を示す指標として、Nash係数(Nash and Sutcliffe, 1970)

$$N_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I (Q_i^{obs} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^I (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}, \bar{Q}^{obs} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I Q_i^{obs} \quad (5)$$

がしばしば使われ、パラメータ同定の目的関数としても用いられる。上式の Q_i と Q_i^{obs} は、時刻 i の計算流量と観測流量を表す。 I は対象洪水の時間数である。この指標の値が1.0のとき、モデル計算値と観測値とが完全一致することを表し1.0に近いほど再現精度が高いことを表す。一般的にこの値が0.7以上の場合、モデル計算値の再現性が高いと判断される。加藤ら(2024)はこの(5)式のNash係数を拡張して、複数の洪水事象と流量観測地点での計算流量の再現性を評価するために新たに6種類の6種類の指標を提案し、それぞれの指標でパラメータを同定するとともに再現性を評価した。そのうちのひとつである A_{all1} を以下に示す。

$$A_{all1} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{i=1}^{I_{j,k}} \left(\frac{Q_{i,j,k}^{obs}}{A_j} - \frac{Q_{i,j,k}}{A_j} \right)^2}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{i=1}^{I_{j,k}} \left(\frac{Q_{i,j,k}^{obs}}{A_j} - \bar{q}^{obs} \right)^2} \bar{q}^{obs} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \sum_{i=1}^{I_{j,k}} Q_{i,j,k}^{obs}}{J_k \times \sum_{k=1}^K I_{j,k}} \quad (6)$$

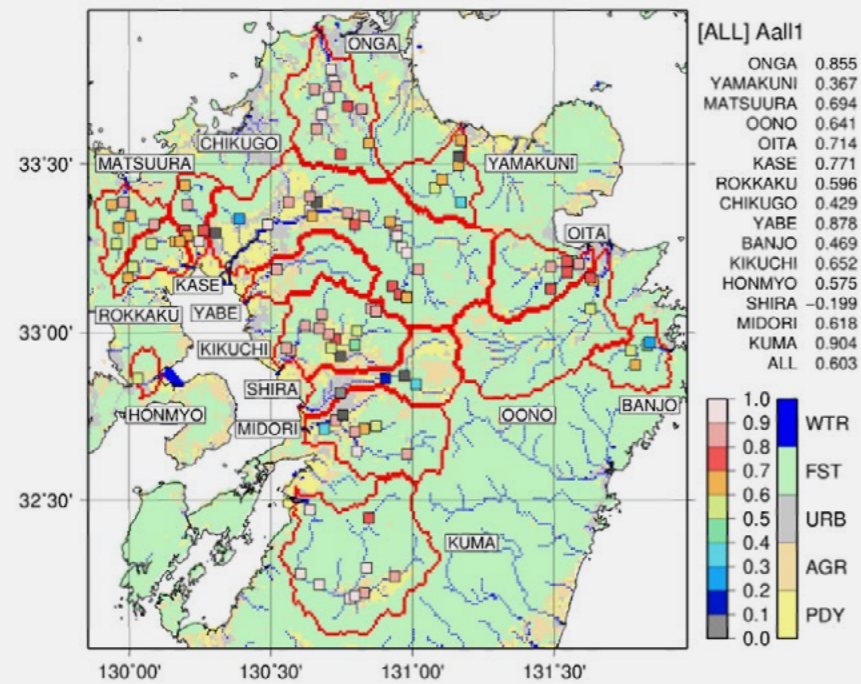
ここで J は観測地点数、 K は洪水事象数、 $I_{j,k}$ は観測地点 j と洪水事象 k の観測時間数、 A_j は観測地点 j の上流にあるモデル上のグリッド数(流域面積に相当する)、 $Q_{i,j,k}$ と $Q_{i,j,k}^{obs}$ は観測時刻 i 、観測地点 j 、観測事象 k の計算流量と観測流量を表す。この指標では観測地点間の流量規模の違いを考慮するために流域面積で除した流出高での計算値と観測値との違いを評価している。

5.1.2 同定されたモデルパラメータセットの特徴

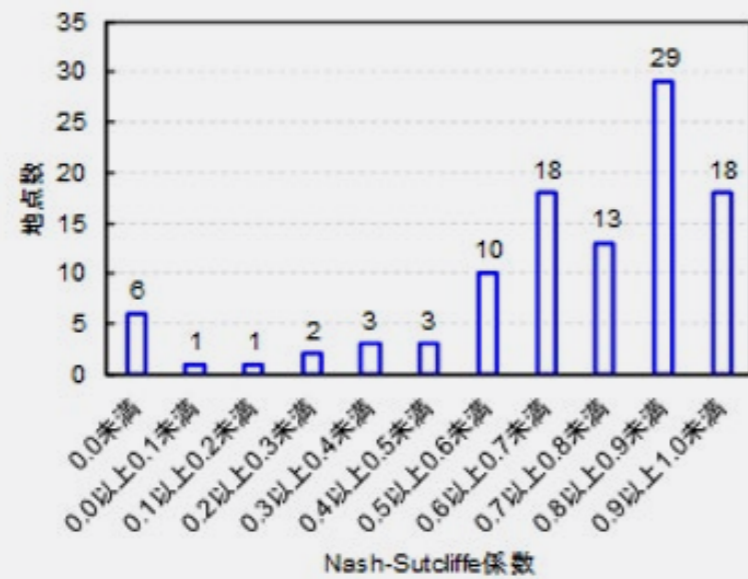
分布型降雨流出モデル1K-DHMを示す九州の15河川流域に適用した。複数の土地被覆を含む菊池川流域(流域面積996km²)を対象として、(6)式の目的関数を最大化するようにSCE-UA法を用いて土地被覆ごとのパラメータ値を同時に推定した。同定の対象とすると土地被覆区分は畑地、水田、山地、都市の4種類である。それらの空間的分布図を図-20(上)に示す。また、得られた土地被覆ごとのパラメータセットの値を表-3に示す。SCE-UA法によって得られた上位10位以内のパラメータセットの値は、いずれの土地被覆でもパラメータの値が狭い範囲に分布し、土地被覆毎のパラメータ値にも明瞭な違いが現れた。また、それらの値の大小関係が土地被覆毎の物理的な特徴を反映していることから、流域の物理的実態を反映したパラメータ値を同定することができたと考えられる。

5.1.3 再現性の分析結果と考察

得られたパラメータ値を用いた場合の洪水の再現性を、菊池川を含む九州地方の15流域(104地点)において5つの洪水事例で検証した。図-20(上)に(6)式を用いて計算した評価指標の値を色分けして示す。評価指標が良好な地点が概ね各流域に偏りなく分布している。また、どの流域もNash係数の良好な地点が上下流に偏りなく分布していることがわかる。図-20(下)は指標の頻度分布図である。評価係数が0.5以上0.8未満の地点が41地点、0.8以上の地点が47地点となり、特に上流域の面積が500km²以上であれば河川流量を高い精度で再現できることを確認した。土地被覆をもとにした多地点、複数の洪水事例を対象とする同定計算は有効な手法であり、土地被覆を用いたパラメータの総合化の適用可能性を確認した。



A) 九州地方北部の土地被覆分布図と(6)式による洪水の再現性の空間分布図



B) 洪水流量の再現性の頻度分布

図-20 九州地方の土地被覆分布図。WTRは河道、FSTは森林、URBは都市、AGRは農地、PDYは水田を表す。上図に観測地点ごとの(6)式による再現性の評価値を加えた。下図は(6)式による洪水の再現性の観測地点数の分布である。多くの観測地点で0.6以上の値が得られた(加藤ら(2024)より)。

表-3 土地被覆ごとに同定されたモデルパラメータの値。

| | 水田 | 畑地 | 森林 | 都市 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 斜面部のマンニングの粗度係数： n_s [$m^{-1/3}s$] | 1.47×10^{-1} | 1.25 | 8.06×10^{-1} | 6.78×10^{-1} |
| 大空隙部の透水係数： k_a [m/s] | 8.16×10^{-3} | 5.02×10^{-2} | 7.52×10^{-2} | 5.79×10^{-3} |
| 大空隙部の空隙厚： d_a [m] | 0.00 | 0.00 | 1.10×10^{-1} | 0.00 |
| マトリクス部の空隙厚： d_c [m] | 5.21×10^{-1} | 8.91×10^{-1} | 5.36×10^{-1} | 0.00 |
| 透水係数に関するパラメータ： β [-] | 1.00×10 | 2.25 | 1.06×10 | 1.07×10 |
| 河道部のマンニングの粗度係数： n_c [$m^{-1/3}s$] | 2.49×10^{-2} | 3.58×10^{-2} | 2.26×10^{-2} | 2.89×10^{-2} |

5.1.4 まとめと考察

菊池川を対象として複数地点、複数の洪水事例を用いて分布型降雨流出モデル1K-DHMの土地被覆毎のパラメータを同時に同定する手法を開発した。次に、菊池川を含む九州北部の15流域に得られたパラメータを適用することで、複数の流域、地点、洪水事例の流量の再現性を確認した。菊池川の土地被覆をもとに同定したパラメータは、再現性の検証に使用した全15流域104地点中、Nash係数0.5以上0.8未満の地点が41地点、0.8以上の地点が47地点と多くの地点で良好な再現性を示した。本手法は、土地被覆をもとにした多地点、複数の洪水事例を対象とする同定計算は有効な手法であると考えられる。

5.2 表層土壌情報を加えた分布型降雨流出モデルのパラメータ総合化

前節では土地被覆ごと分布型降雨流出モデルのパラメータセットを同定する手法を示した。日本の国土に森林域の占める割合は67% 存在するため、森林域のパラメータ値が適切に設定できるかどうかは洪水予測の精度を決める。森林域といっても、そこでの表層土壌や基岩の空間分布は大きく異なり、表層土壌や基岩の違いが降雨流出現象に大きく影響することが多数の研究によって示されている。そこで、森林域の表層土壌分布の違いを1K-DHMに反映させ、降雨流出現象の再現性を向上させることを目的とした(加藤ら、2025)。

5.2.1 分析手法

前節で用いた図-20の土地被覆区分(畑地, 水田, 森林, 都市)に加えて、農研機構の土壌図情報を用いて森林域をさらに黒ボク土、褐色森林土、赤黄色土、その他の土壌に分類した。土地被覆分布図に土壌分布を加えた図を図-21に示す。菊池川流域では、森林域に含まれる黒ボク土、褐色森林土、赤黄色土の面積率が33.3%, 33.3%, 26.9%であり、ほぼ均等に分布している。

5.2.2 同定されたモデルパラメータセットの特徴

最適同定した土地被覆別、表層土壌別のパラメータ値を用いて設定した斜面部の水深 h と単位幅流量 q との関係(h - q 関係式)を図-22に示す。この曲線は4.1(2)で示した式(4)に、同定したパラメータ値を設定して作成したものである。斜面勾配 i はすべて0.1とした。図-22(上)に前節で同定した水田、畑地、森林、都市に対する h - q 関係式を、図-22(下)に森林域を黒ボク土、赤黄色土、褐色森林土、その他の土壌に分類して同定した h - q 関係式を示す。

これらを比較すると、褐色森林土の h - q 関係式は森林のそれと類似しているが、黒ボク土と赤黄色土のHQ曲線の形状は森林同様として同定した曲線とは大きく異なる結果となった。特に黒ボク土は同じ水深(土壌水分)に対する流量が小さく流出応答が遅い h - q 関係式となっており、黒ボク土の特徴をよく表している。赤黄色土では逆に早い流出応答を示す h - q 関係式が得られた。また、土地被覆別の h - q 関係式は、都市域の早い応答と畑地の中間的な応答を示す関係式は変化せず、水田のみが都市域に近い早い応答関数に変化した。水田は森林域に比べて浸透性が低く流出応答は早いと考えられるため、今回、新たに同定された水田の h - q 関係式は、森林を表層土壌に分類してより適切な関係式が得られたことが、他の土地被覆の特性にも反映した妥当な関係式が得られたと考えられる。

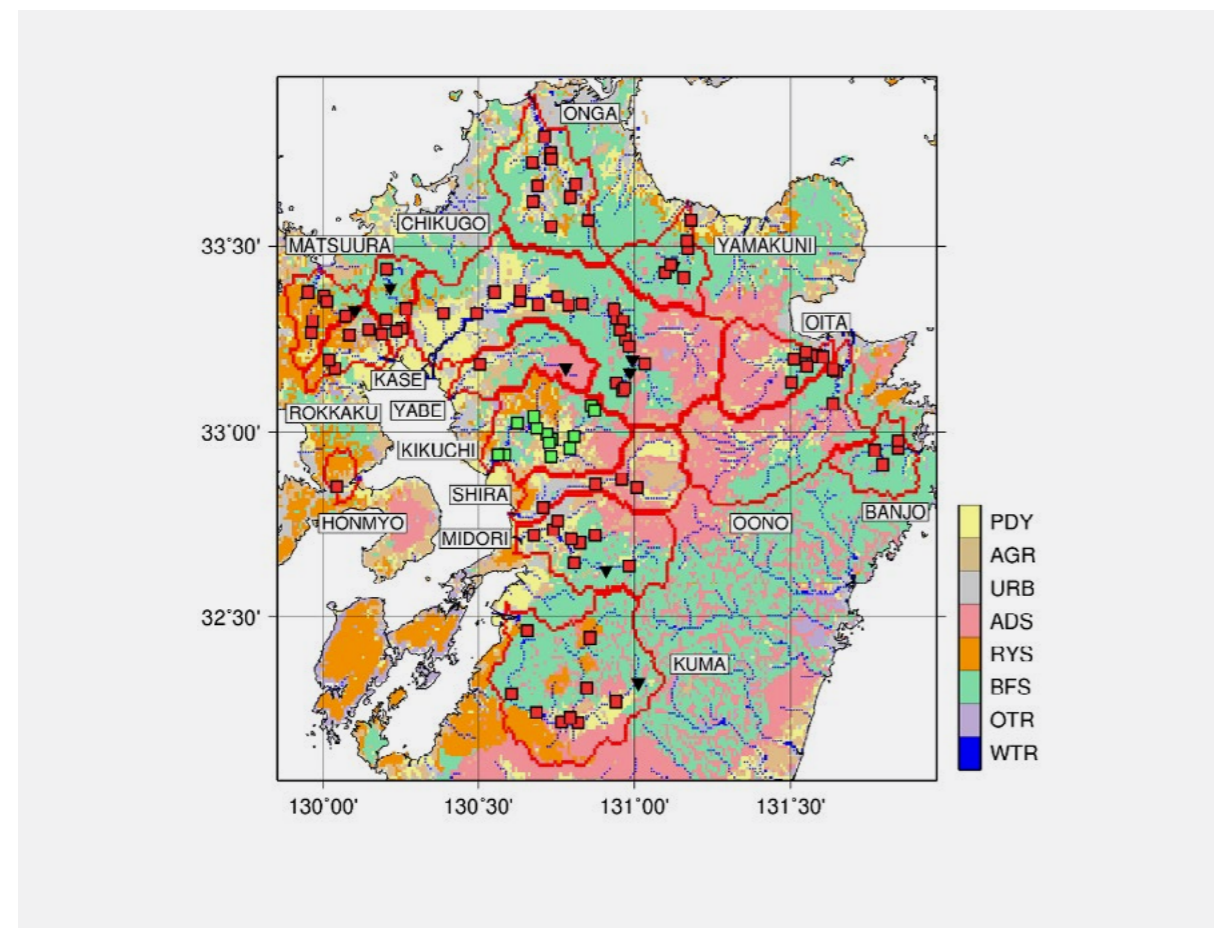
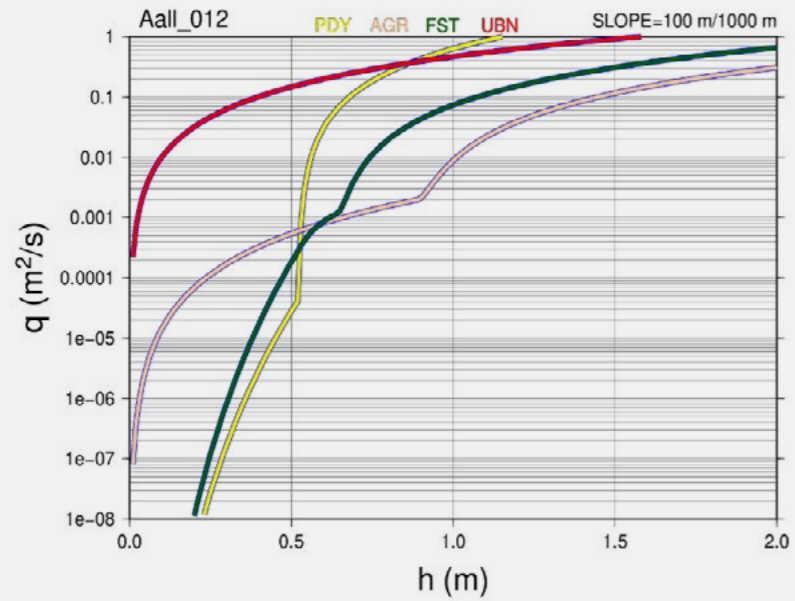
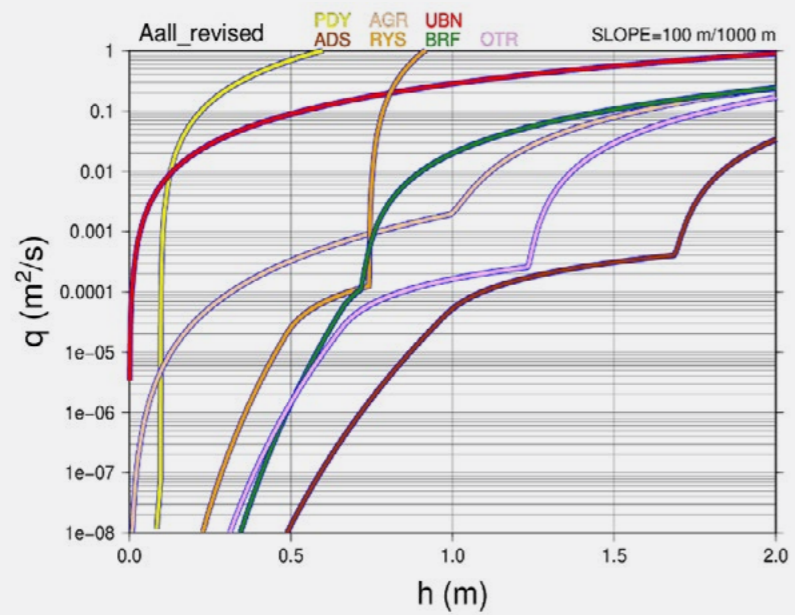


図-21 九州地方北部の土地被覆分布図に表層土壌分布を加えた分布図。PDYは水田、AGRは畑地、UBNは都市、ADSは黒ボク土、RYSは赤黄色土、BFSは褐色森林土、OTRはその他の土壌、WTRは河道を表す。図中の□は河道上の流量観測地点を表す。パラメータ同定と再現性の検証の対象とした菊池川の観測地点を黄緑色、それ以外の14流域の観測地点を赤色で示す。▼はダム地点を表す(加藤ら(2025)より)。



A) 土地被覆情報のみを用いて得たh-q関係式



B) 土地被覆情報と表層土壌情報を用いて得たh-q関係式

図-22 土地被覆および土壌別のh-q関係式。(a)は土地被覆分布のみを反映して同定したパラメータ値によるh-q関係式、(b)は土地被覆分布と土壌分布を反映して同定したパラメータ値によるh-q関係式である。横軸は水深、縦軸は単位幅あたりの斜面流量を表す。PDYは水田、AGRは畑地、FSTは森林、UBNは都市、ADSは黒ボク土、RYSは赤黄色土、BRFは褐色森林土、OTRはその他の土壌を表す(加藤ら(2025)より)。

5.2.3 再現性の分析結果と考察

土地被覆分布のみに基づくパラメータ同定に比べて、土地被覆分布と土壌分布の両方を用いた同定によってどの程度、評価指標が改善したかを確認する。Nash係数の改善幅と土壌分布反映後のNash係数とで8つのカテゴリを設定し、土壌分布の反映によ

る効果を観測地点単位で評価した。具体的には、観測地点ごとに表-4に示すG++, G+, G-, G--, B++, B+, B-, B--の8つのどれに分類されるかを調べた。8つのカテゴリに分類した観測地点の空間分布を図-23に示す。

表-4: 土壌分布反映後のNash係数の改善値の8つのカテゴリ設定

| 土壌分布情報の反映によるNash係数改善値 | 土壌反映後のNash係数 | |
|-----------------------|--------------|-------|
| | 0.5以上 | 0.5未満 |
| 0.1以上 | G++ | B++ |
| 0以上0.1未満 | G+ | B+ |
| -0.1以上0未満 | G- | B- |
| -0.1未満 | G-- | B-- |

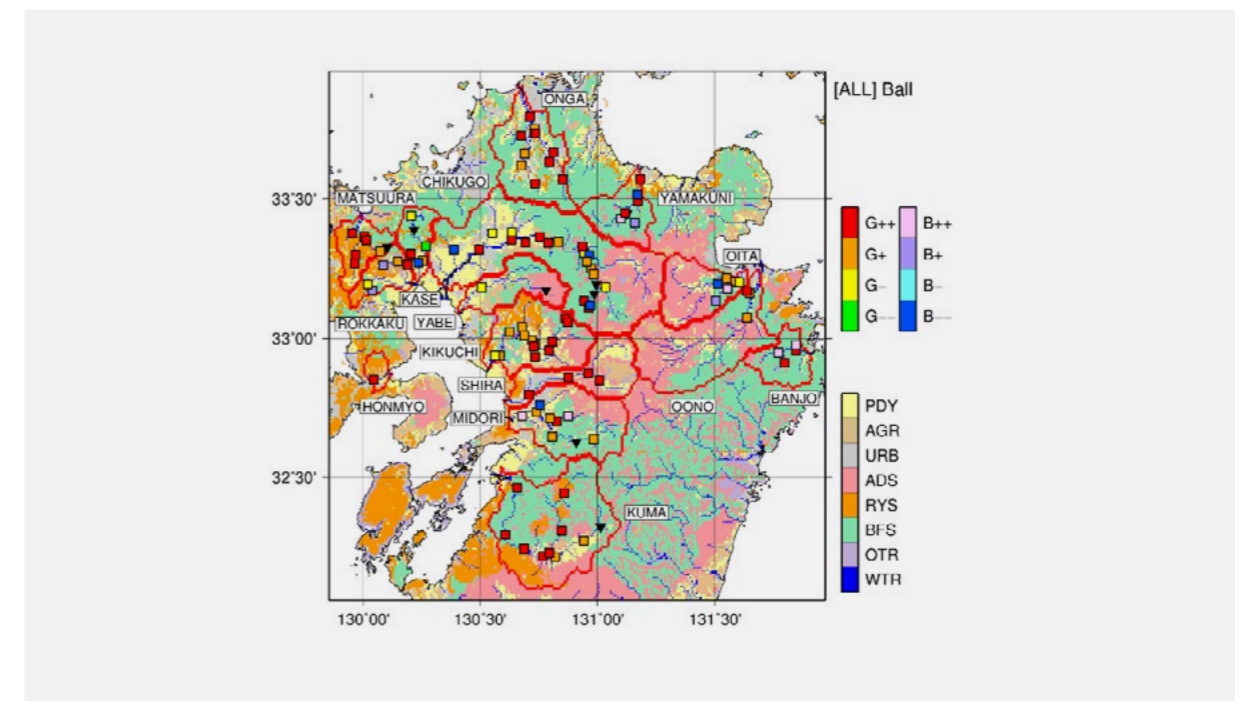


図-23 土壌分布の反映によるNash係数の改善を示す8つのカテゴリの空間分布 (Ball指標を用いて算定)。河道上の□が観測地点であり観測地点ごとにカテゴリ分類を示す(加藤ら(2025)より)。

パラメータ同定の対象とした菊池川の観測地点は、1地点を除いてG++かG+に分類された。G-に分類された地点もNash係数の悪化幅は極めて小さい。菊池川についてはほぼ全ての地点でNash係数が改善し良好な値が得られた。菊池川以外の流域についてもG++やG+に分類される観測地点が多く、B-やB-に分類される観測地点は少ない。一方でNash係数が最も悪化したカテゴリであるG-、B-は、大分川、嘉瀬川を含め、限られた流域に分布している。土壌分布反映後も依然としてNash係数の値が小さいカテゴリであるB++、B+、B-、B--も、一部の流域に集中していることがわかった。

5.2.4 まとめと考察

土壌分布情報を反映させることにより、黒ボク土と赤黄色土について土壌の流出特性を反映したパラメータ値を得ることができた。さらに、水田のパラメータ値にも影響が現れ、流出応答の早いより現実に即したパラメータ値を得ることができた。その結果、パラメータ同定計算の対象とした菊池川の観測地点の流量再現性が改善し、さらに菊池川流域と土地被覆・土壌特性の類似した観測地点の流量再現性も改善が見られた。この結果は、パラメータ同定時により多様な特性をもつ複数の観測地点を対象とすることにより、更に再現性の良好なパラメータを得ることができる可能性を示している。



6. 今後の課題

気候変動による短時間の降水強度の増加が進行する中で、水害リスクの変化を予測し、誰もが水害リスク情報を利用できるようにして、水害による被害を最小化する必要がある。

現在、政府は一級水系109河川を対象として気候変動の影響を考慮した「河川整備基本方針」の見直しを急ピッチで進めている。今後は、気候変動シナリオのもとでの水害ハザードマップや水害リスクマップを作成し、現状のそれらと比較して、水害ハザードおよび水害リスクが高まる可能性のある地域を抽出する必要がある。これらの情報は、国が進める流域治水の取り組みに欠かせない情報であり、また、民間セクターが現状の産業基盤や新たな基盤を構築する際のリスク評価に寄与する情報となる。

こうしたリスク情報の精度を高めるためには、水害を引き起こす降水情報の高度化が欠かせない。本レポートで紹介したd4PDFは水害リスクを評価するために必要となる多数のアンサンブルデータを持つ画期的なデータベースである。本レポートでは、空間解像度約20kmにダウンスケーリングしたd4DFデータを用いた分析結果を紹介したが、中小河川流域を含めて我が国の河川流域を対象とするためにはより解像度の高い降水データが必要である。幸い、空間解像度5kmにダウンスケーリングされたd4PDFデータが作成され利用されて始めている。こうした高解像度の気候データセットを用いることによって二級水系においても水害リスク情報の整備が進み、水害リスク情報の空白域がなくなることが期待できる。

水害リスク情報の精度を高めるためには、入力情報となる降水データセットの整備と同時に、任意の河川流域での洪水・氾濫予測を可能とする水工シミュレーションモデルの高度化が欠かせない。本レポートで紹介したように、水害リスクを予測する基本は河川流量の予測精度を高めることである。地形情報や土地被覆、表層土壌、地質に関する空間情報の高解像度化が進んでおり、これらの情報を用いて降雨流出シミュレーションモデルの地域総合化を急ぐ必要がある。あらゆる河川流域に適用し、あらゆる地点での河川流量を予測する降雨流出シミュレーションモデルを開発して、水文観測情報の存在しない河川流域でも河川

流量をある一定の精度をもって予測することが重要な研究課題である。5章で紹介した研究を今後とも進める必要がある。

こうしたリスク情報の整備は、日本の河川流域だけを対象とすればよいものではない。世界のどこかで大水害が発生すれば、その地域の社会経済に大きな影響を与え、それは日本の社会経済にも影響を及ぼす。世界の水災害の防止・軽減に貢献するために、また、世界に展開する日本企業や日本国民が洪水の被害を受けないようにするために、世界の任意の河川流域に適用できる洪水予測手法の開発と水災害ハザード・リスク情報の生成が必要となる。(株)東京海上研究所と進めている共同研究は、これらの問題意識をもとに進めているものであり、持続可能な社会を構築する上で、欠かせない研究開発となる。

謝辞

本レポートで示した気候変動シナリオのもとでの河川流量予測は、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d4PDFを用いて得られたものである。本レポートの4.3および4.4で引用したベトナムおよびタイの河川を対象に実施した気候変動による洪水ハザードの頻度・強度の変化に関する研究、5.1および5.2で引用した分布型降雨流出モデルの地域総合化に関する研究は(株)東京海上研究所との共同研究によるものである。本レポートを作成するに当たっては東京海上ホールディングス(株)の協力を得た。



参考文献

APHRODITE's Water Resources: Asian precipitation -highly-resolved observational data integration towards evaluation of extreme events, <http://aphrodite.st.hirosaki-u.ac.jp/index.html>

Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, 158(3-4), pp. 265-284, 1994. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4)

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., Nagatomo 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 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(7), pp. 1383-1398, 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

池淵周一, 椎葉充晴, 宝馨, 立川康人: エース水文学, 朝倉書店, 初版第1刷, 2006. 第14刷, 2022. https://www.asakura.co.jp/detail.php?book_code=26478&srsltid=AfmBOoqtB11K2t-QJMn0Au081OqGtTFP-Xxkm3hR0cReyee4FRdfmq0B

加藤大輔, 加藤雅也, 田中智大, FENG Shi, 立川康人: 流域の土地利用を反映した分布型降雨流出モデルのパラメータ総合化, *土木学会論文集*, 80(12), 24-00068, 2024, <https://doi.org/10.2208/jscej.24-00068>

加藤大輔, 加藤雅也, 田中智大, FENG Shi, 立川康人: 流域の土地利用分布と土壌分布を反映した分布型降雨流出モデルのパラメータ総合化, *土木学会論文集*, 81(11), 25-00052. 2025, <https://doi.org/10.2208/jscej.25-00052>

加藤大輔, 篠原瑞生, 永野隆士, 加藤雅也, 坪木和久, 田中智大, 立川康人, 中北英一: d4PDF を使用したベトナム・紅河の極値流量の将来変化予測, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 76(1), pp. 107-117, 2020, https://doi.org/10.2208/jscejhe.76.1_107

加藤大輔, 篠原瑞生, 加藤雅也, 坪木和久, 田中智大, 立川康人: 複数のバイアス補正を適用したd4PDFによるチャオプラヤ川の極値流量の将来変化予測, *土木学会論文集B1 (水工学)*, 78(1), pp. 35-47, 2022, https://doi.org/10.2208/jscejhe.78.1_35

金丸昭治, 高棹琢馬: 水文学, 朝倉土木工学講座4, 1975.

気象庁 大気海洋部気象リスク対策課: 雨による災害危険度を表す指数と警報の危険度分布, *測候時報*, 9(8), 2023. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/90/vol90_8.pdf

気象庁: 日本の気候変動2025 —大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>

京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 水文・水資源分野: 1K-FRM/DHM, A distributed flood routing model and distributed hydrologic model based on kinematic wave theory using HydroSHED topography data, 2020, <https://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html>

国土交通省 水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 計画編 (基本計画編)、令和7年8月時点. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/keikaku/index.html

国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会: 「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言、令和3年4月改訂 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/

小林敬汰, 田中智大, 篠原瑞生, 立川康人: d4PDFを用いた日本全国一級水系における極値流量の将来変化分析, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 76(1), pp. 140-152, 2020 https://doi.org/10.2208/jscejhe.76.1_140

椎葉充晴, 立川康人, 市川温: 水工計画学, 第1章 地表面付近の雨水流動, 京都大学学術出版会, 2013. <https://www.kyoto-up.or.jp/book.php?id=1865>

立川康人, 宮脇航平, 田中智大, 萬和明, 加藤雅也, 市川温, キムスンミン: 超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析, *土木学会論文集B1 (水工学)*, 73(3), pp. 77-90, 2017, <https://doi.org/10.2208/jscejhe.73.77>

農業・食品産業技術総合研究機構: 日本土壌インベントリー, 縮尺20万分の1土壌図, <https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/offer.html>

執筆者

立川 康人
京都大学 大学院工学研究科
社会基盤工学専攻 教授

協力

東京海上ホールディングス株式会社

発行日

2026年3月



東京海上グループ