

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏名</b> (ふりがな)		<b>所属</b>		<b>役職</b>
	山田 朋人 (やまだ ともひと)		北海道大学大学院 工学研究院		准教授
<b>②研究テーマ</b>	名称	局地的豪雨の時空間分布を考慮した洪水氾濫のリスク評価			
	政策領域	[分野] 地域課題分野 (河川)	融合技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)	
		[公募課題]			
<b>③研究経費</b> (単位: 万円)	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計	
※端数切り捨て。	178.2 万円	178.2 万円	142.6 万円	499.0 万円	
<b>④研究者氏名</b> (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名		所属・役職 (※平成30年3月31日現在)			
星野 剛		北海道大学大学院工学研究院			
北野 慈和		北海道大学大学院工学院・博士後期課程(平成28年3月まで) 現在, 電力中央研究所			
<b>⑤研究の目的・目標</b> (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<p>2014年9月に北海道中央部において線状降水帯による豪雨, 2016年8月には北海道内の複数流域において4つの台風の上陸・最接近による豪雨が発生した。これら近年頻発している洪水・土砂災害に対して, 降雨流出過程に内在する不確実性を考慮した確率論的な検討を行う。具体的には, 豪雨の時空間分布に起因する流出量および洪水氾濫リスクの確率的評価を実施する。</p> <p>対象とする豪雨事例は上記の2つの豪雨災害とし, 現地観測データや降雨レーダ情報等による降雨の時空間分布特性を分析する。得られた情報を用いてこれまでの決定論的議論に加え, 確率微分方程式として記述される降雨流出モデルによる確率的議論を提案し, 得られた結果から流出量の不確実性を評価する。さらに, 確率情報付の流出量を洪水氾濫モデルに適用することで本研究の目的を達成する。</p>					

## ⑥研究成果

(様式 E-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究は図-1に示すように、大雨の不確実性および降雨の時空間特性を評価し、降雨や流出モデルの不確実性を踏まえた氾濫リスク評価を実施した。それぞれの成果について詳述する。

### 1. 大量アンサンブル気候データを用いた降雨量とその時空間特性の把握

近年、膨大な気候シミュレーションによる大量アンサンブル気候データベースが作成され、過去の気候や温暖時の気候における数千年分の気候データが利用可能となった。洪水リスクの評価にこのデータを用いる最も大きな利点は気候システムの自由度がもたらす極端現象の生起確率を物理的モンテカルロ手法により推定可能とする点にある。我が国をはじめとする先進国ではこれまで数十年間に渡る降雨観測を継続しており、それにより自然現象の理解の進展ならびに確率降雨等を基軸とした治水計画が作られてきた。一方、降雨をもたらし気候システムの自由度は膨大な大きさを有しており、数十年間で各地域が経験しうる降雨イベントが発生したとは言い難い。大量アンサンブルデータの使用は計画規模に相当する大雨の生起確率を物理的モンテカルロ手法によって評価可能とし、数十年間の観測に基づいて設定された確率雨量の振れ幅を推定可能とする。また、洪水被害は降雨の時空間的なパターンにも依存するが、大量アンサンブルデータ内には様々な降雨の時空間分布が含まれることから、流域平均雨量だけでなく降雨の時空間特性を踏まえた洪水リスクの評価が可能となる。このように大量アンサンブルデータの利用は洪水リスクの評価に新たな視点を加えうるものである。

本研究は大量アンサンブルデータを用いた大雨の強度およびその時空間特性の評価手法を提案し、過去と温暖時の気候条件下で同手法を適用することで温暖時における洪水外力の変化を把握するものである。同手法を北海道内の石狩川石狩大橋基準地点での集水域（以下、石狩川流域）に適用し、洪水外力を評価した。

#### (1) 力学的ダウンスケーリングによる降雨の時空間分布の作成

図-2に石狩川流域での年最大流域平均3日降雨量の頻度分布を示す。同図より、既往最大の降雨量以上の大雨も大量アンサンブルデータには複数含まれていることが確認でき、このデータはそのような低頻度の大雨の確率的な評価に適した情報であることが確認できる。また、力学的ダウンスケーリング(DS)により降雨量の大きい事例の頻度が高くなり、より実績に近づいていることがわかる。同様に1時間降水強度および降雨の時空間特性もDSにより実績値に近づくことが確認できたため、以降の評価ではDS実施後の結果を用いた。

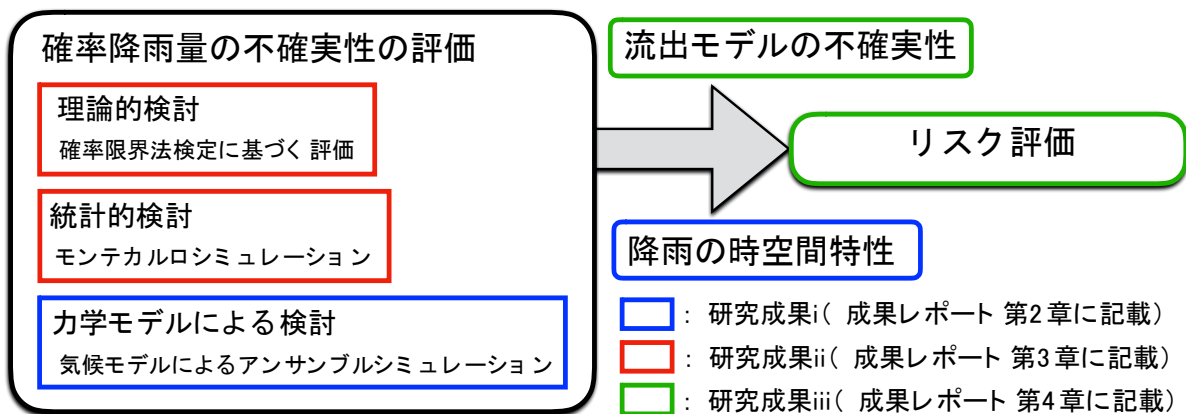


図-1 降雨量の不確実性の評価と不確実性を考慮したリスク評価までの流れ

(2) 過去と温暖時の気候条件下における降雨特性

図-3に過去と温暖時の気候条件下における石狩川流域における72時間流域平均降雨量を算出すると、温暖時の降雨量は増大し、99%ile値においては1.16倍となることが示された。図-4に石狩川流域における過去実験と4℃上昇実験での降雨の時空間的な集中度と両者の比を示した。同図より、温暖後の気候条件化においてはいずれの対象時間、対象面積に対しても累積降雨量が高いことがわかる。その倍率は、対象面積、対象時間を小さくするほど大きくなり、降雨が時空間的に集中化することがわかる。流域全体での72時間降雨量99%ile値は1.16倍であったものの、対象時間が短く、対象面積が狭くなるほどその倍率は大きくなり、最も大きい箇所では1.76倍に達した。

このような降雨量の増大、降雨の時空間特性の変化は洪水被害の頻度や被害のパターンを変えるものと考えられ、今後の治水対策を考える上で重要な知見となる。

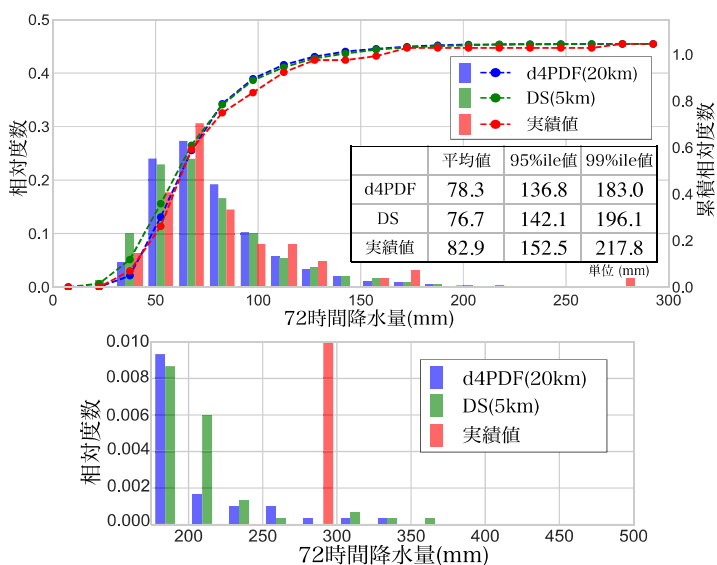


図-2 DS前後と実績の石狩川流域での年最大流域平均3日降雨量の頻度、下は99%ile値以上の降雨量に着目したもの。

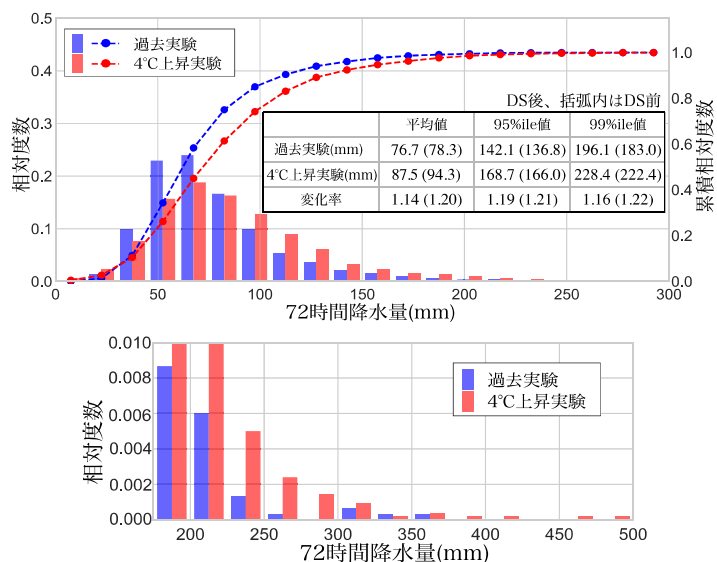


図-3 DS後の過去実験と4℃上昇実験の石狩川流域での年最大流域平均3日降雨量の頻度、下は99%ile以下に着目したもの。

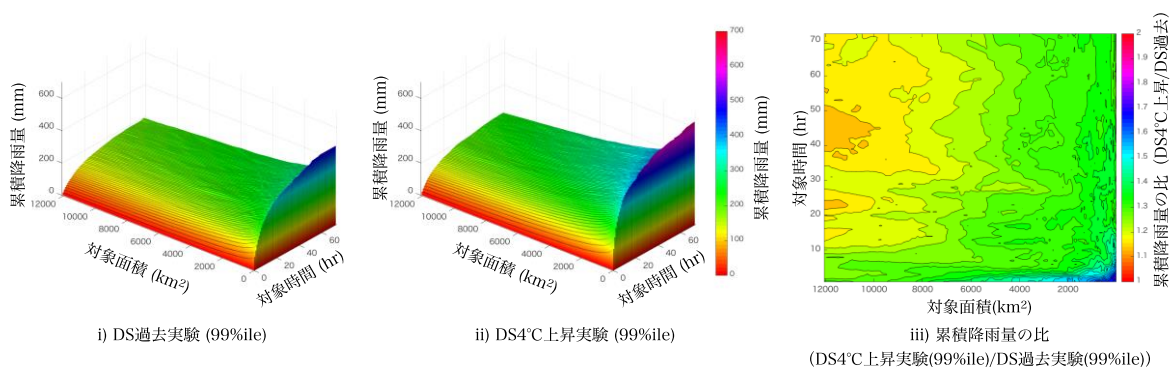


図-3 DS後の降雨の時空間的な集中度 (左: 過去実験、中: 4℃上昇実験)、右は両者の比

## 2. 確率限界法検定に基づく確率分布モデルの信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法

限られた極値水文データに基づき未曾有の豪雨を評価するためには、確率水文量の分布を考慮すべきであることを提案し、確率分布モデル自体が取りうる幅(信頼区間)を水文頻度解析に導入することで、従来手法に基づき設定した計画値を超える水文量が発生する可能性を定量的に明らかにする手法を提示する。ここで、確率分布モデルの信頼区間とは、実際に起きる可能性のあった過去の大雨の極値データから求めた確率分布モデルがとる幅である。本研究では、確率限界法検定を応用することで、できるだけ解析的に確率分布モデルの信頼区間を導出する新たな方法を提示し、また、この方法に基づき導出した信頼区間の精度が極めて高いものであることを示す。

図-4にモンテカルロシミュレーションにより導出した確率年最大日降水量

の分布と本手法により算出した確率年最大日降水量の諸量を記入した確率紙を示す。この結果から、水文頻度解析に確率限界法検定に基づく確率分布モデルの信頼区間とモンテカルロシミュレーションの分布は整合性があることが確認できる。

本研究では、水文頻度解析に確率限界法検定に基づく確率分布モデルの信頼区間を導入することで、未曾有の豪雨の確率年を正当に評価し、このような豪雨が発生するリスクを定量的に求める理論的枠組みを示した。また、モンテカルロシミュレーションにより数値的に導出した確率水文量の分布と確率限界法検定に基づき解析的に導出した信頼区間を比較し、本研究が提案する信頼区間の精度が極めて高いことを示した。

## 3. 降雨・流出の不確実性を考慮した内外水同時氾濫解析による浸水被害のリスク評価

市街地を河川が貫流し、下水道網が整備されている札幌市をモデルケースとして、山地及び市街地の降雨流出、河道内洪水追跡、地表及び地下施設における氾濫流の挙動を一体的に解析する内外水同時氾濫解析モデルを構築し、下水道や河川で整備目標としている降雨量と降雨強度をもとに設定した様々な降雨外力条件で氾濫解析を行い、総雨量・降雨強度と浸水被害の関係及び被害特性を分析した。また、降雨及び流出モデルの不確実性を考慮した氾濫解析を行い、浸水被害への影響を分析するとともに、不確実性の幅を持った浸水リスクマップを作成し、関係機関が浸水対策の方針や優先度を判断するための手法を提案した。

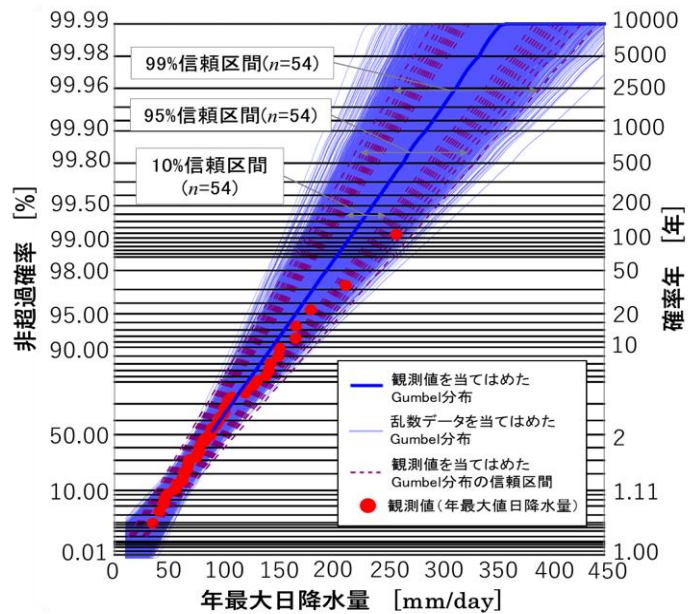


図-4 八斗島観測所における54年間分の年最大日降水量[mm/day]及びこれら54個の観測値を当てはめたGumbel分布(太実線)、10,20,30,40,50,60,70,80,90,95,99%信頼区間(破線)、乱数データを当てはめた5000組のGumbel分布(細実線)を記入した確率紙 ※nは観測値の総数である。



図-5に豊平川右岸域における総降雨量、降雨強度、被害額の関係を示す。総降雨量と降雨強度の増加に伴い被害は増加し、河川の越水により被害額が大きくなる傾向がみられるが、図-5の(a)では総雨量は約160mmと少ないものの降雨強度が60mm/hと大きいために豊平川の氾濫が発生しなくても約800億円の被害が生じている。一方、図-5の(b)では総雨量300mmと大きい、降雨強度が35mm/hと小さいために被害額が200億程度となっている。浸水被害は総雨量だけではなく、降雨強度の影響も大きいことがわかる。

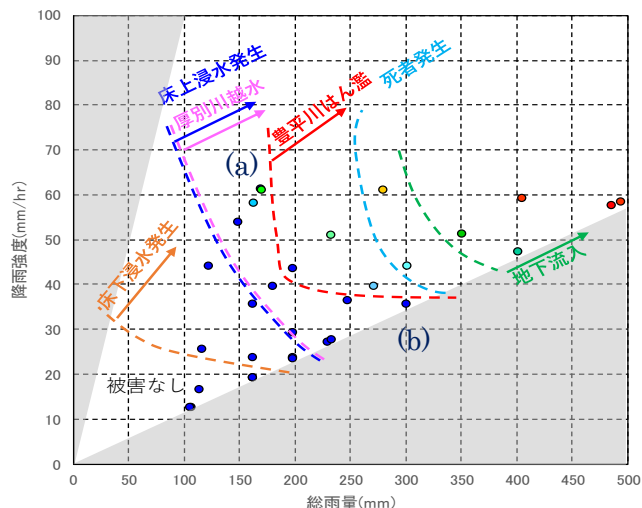


図-5 豊平川右岸域の総雨量～降雨強度～被害額の関係

浸水被害特性の分析結果から浸水による死者が発生する総雨量・降雨継続

時間48時間の氾濫計算結果に作成した浸水リスクランクを適用し、図-6のリスクマップを作成した。図-6は、降雨観測と流出係数の不確実性を考慮した内外水同時氾濫解析の各計算により得られる地点(メッシュ)毎のリスクランクの変化幅を整理したものである。これにより、常にリスクが高いエリアを抽出し、関係機関で早期の浸水対策を判断することができる。

本研究において得られた成果は、降雨流出過程ならびに内水・外水氾濫における外力の不確実性による確率論的な議論を河川政策に反映できるものである。最終年度に大量アンサンブルから構成される過去・将来気候場における高解像度降雨量データを作成することができた。さらには、確率限界法検定による確率分布の信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法を提案した。上記の高解像度降雨量データは物理的モンテカルロ法とも言える手法である一方、後者は理論による信頼区間の議論である。さらには、統計的なモンテカルロ法によって理論値との比較を実施した。これら3通りの異なる手法から得られる結果は調和的であったことから、今後の水文頻度解析に対して幅を有する考え方の科学的妥当性かつ重要性が明らかとなった。これは今後の当該分野における計画を考える上で重要な情報となる。今後は同研究の枠組みを基に将来を含めた洪水氾濫のリスク評価につなげる予定である。

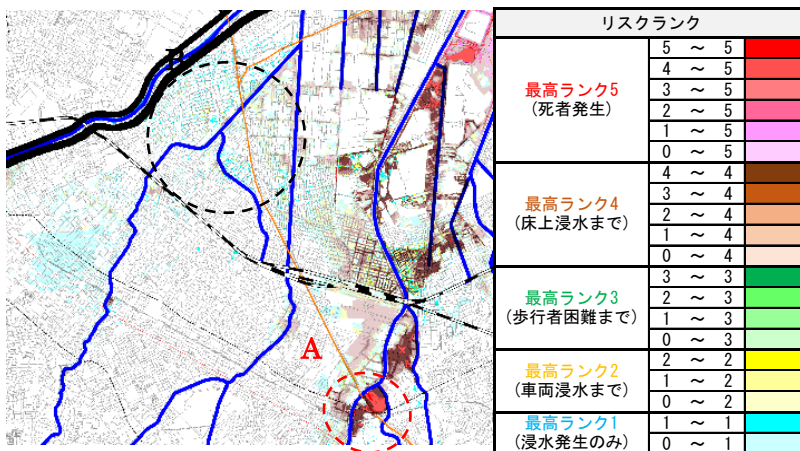


図-6 不確実性を考慮した中間規模(300mm)のリスクマップ

## ⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会妙録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等)

(査読付き論文)

- ・星野剛, 山田朋人: 大量アンサンブル気候予測データを用いた日本国内全一級水系を対象とした年最大流域平均降水量の分析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 74, No. 4, I\_187-I\_192, 2018.
- ・小林彩佳, 岡地寛季, グエンレズン, 山田朋人: 降雨観測の空間分布と気象予測に起因する山地流域における降雨量と河川流量の不確実性. 土木学会論文集G(環境), I\_63-I\_69, 2017.
- ・大屋祐太, 山田朋人: マルチドップラーレーダを用いた札幌圏における豪雪時の気象場の特徴. 土木学会論文集G(環境), I\_269-I\_274, 2017.
- ・大屋祐太, 北野慈和, グエンレズン, 山田朋人: 線状降水帯を対象とした三次元風速場の特徴. 土木学会論文集B1(水工学), I\_43-I\_4.8, 2017.
- ・清水啓太, 山田朋人, 山田正: 確率限界法に基づく確率分布の信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 74, No. 4, I\_331-I\_336, 2018.
- ・山田朋人ら: 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, 河川技術論文集, 第24巻, 2018.
- ・千葉学ら(山田朋人): オランダの治水分野における気候変動適応策の検討・実施状況に関する調査報告, 河川技術論文集, 第24巻, 2018.
- ・金子直広, 山田朋人: 水資源の観点から見た, 石狩川中流域における稲作の現状と将来への示唆, 水利科学(掲載決定)
- ・Tamaki, Y., M. Inatsu, D. Nguyen-Le, and T. J. Yamada: Heavy rainfall duration bias in dynamical downscaling and its related synoptic patterns in summertime Asian monsoon, Journal of Applied Meteorology and Climatology (accepted).

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

- ・どさんこワイド179 番組内「専門家らによる委員会/降雨量など新たに予測し“防災”に」  
平成 29 年 7 月 12 日(木)18:55~18:55 STV
- ・NHKニュースおはよう北海道 番組内「北海道開発局/雨量基準見直しへ 初めての検討会」平成 29 年 7 月 13 日(木) 7:48~7:49 NHK
- ・イチオシ! 番組内 北海道ニュース「初 温暖化を考慮した河川対策へ」平成 29 年 7 月 12 日(水) 18:19-18:20 HTB
- ・HBC 今日ドキッ! 番組内「北海道開発局など/大雨の“将来予測”を公表」平成 29 年 11 月 21 日(火) 18:29~18:33 HBC
- ・STV どさんこワイド朝 番組内 北海道チェックボックス「最新予測で降雨 1.4 倍か」  
平成 29 年 11 月 22 日(水) 6:41~6:42 STV
- ・北海道新聞 2017年7月13日
- ・北海道通信 2017年7月13日
- ・読売新聞 2017年7月13日
- ・北海道建設新聞 2017年7月13日
- ・建設通信新聞 2017年7月14日
- ・北海道新聞 2017年11月22日
- ・北海道建設新聞 2017年11月22日
- ・北海道通信 2017年11月22日
- ・建設通信新聞 2017年11月24日
- ・建設行政新聞 2017年11月29日
- ・北海道建設新聞 2018年3月10日
- ・北海道通信 2018年3月12日
- ・建設工業新聞 2018年3月13日
- ・北海道新聞 2018年3月14日
- ・建設通信新聞 2018年5月14日

### ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

なし

### ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究において得られた成果は、降雨流出過程ならびに内水・外水氾濫における外力の不確実性による確率論的な議論を河川政策に反映できるものである。最終年度に大量アンサンブルから構成される過去・将来気候場における高解像度降雨量データを作成することができた。さらには、確率限界法検定による確率分布の信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法を提案した。上記の高解像度降雨量データは物理的モンテカルロ法とも言える手法である一方、後者は理論による信頼区間の議論である。さらには、統計的なモンテカルロ法によって理論値との比較を実施した。これら3通りの異なる手法から得られる結果は調和的であったことから、今後の水文頻度解析に対して幅を有する考え方の科学的妥当性かつ重要性が明らかとなった。これは今後の当該分野における計画を考える上で重要な情報となる。今後は同研究の枠組みを基に将来を含めた洪水氾濫のリスク評価につなげる予定である。

### ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

大量アンサンブル数から構成される気候データを用いた洪水外力の評価手法を示した。同手法は物理的モンテカルロ手法により、過去数十年の観測値に基づく確率雨量の信頼性を評価できるものである。また、流域平均雨量だけではなく降雨の時空間分布をも考慮されることから、降雨の時空間分布の違いを踏まえた洪水リスクの評価を可能とする。この結果は確率限界法検定による確率分布の信頼区間として定量的に扱うことができることが明らかとなった。今後懸念される計画規模以上の降雨外力に対して、この「幅」を有するという気候の自由度、観測限界、自然現象の揺らぎに立脚した考え方をソフト・ハードそれぞれにおいて河川政策に活用しなければ、実績以上の規模で襲ってくる降雨外力への備えは困難である。「幅」の扱い方としては、現在のT年確率に対して信頼区間の幅を掛け合わせることでリスクとして定量化でき、これは今後取りうる河川政策の質を向上させるものであろう。