

河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者		氏 名 (ふりがな)	所 属	役 職
		渡部哲史 (わたなべさとし)		京都大学
②研究テーマ	名称	大規模気候データを活用したこれからの河川計画策定に向けた技術開発		
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。		令和 2 年度	令和 3 年度	合 計
		198 万円	397 万円	596 万円
④研究者氏名				
氏 名		所属機関・役職 (※令和 4 年3月31日現在)		
池内 幸司		国立大学法人東京大学 教授		
小槻 峻司		国立大学法人千葉大学 准教授		
阿部 紫織		三井共同建設コンサルタント株式会社 主任技師代理		
⑤技術研究開発の目的・目標				
<p>本研究の目的は、<u>従来の河川計画に、気候実験に基づく数千年単位の河川流量および浸水リスク推計を活用する方法論を開拓する</u>ことである。気候実験により得られた数千年単位の気候データを基に超長期間の降雨流出氾濫モデル計算を実施し、数千年単位の河川流量および浸水リスクを推計する。この推計結果を河川計画に活用する方法を開拓する。また、増額分として同様の取り組みについて渇水を対象に拡張することにも取り組む。現在の河川計画において重要とされる基本高水流量や計画高水流量に新たな知見を与える事に資するものである。さらに大規模流量データを活用し、深層学習に基づく浸水予測モデル・エミュレータを開発する。物理モデルによる計算を簡易的に実施することが可能になることから、限られた財政下で高効率かつ高信頼性の浸水リスク推計ならびに渇水リスク推計を実施することに資するものである。</p> <p>本研究の具体的な目標は以下の通りである。</p>				
1：降雨流出氾濫モデル実験に適したバイアス補正データセットの整備				
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) の日本域ダウンスケール版の結果である現在再現実験 60 年×50 アンサンブル (3000 年)、将来予測実験 60 年×6SST パターン×15 アンサンブル (5400 年) から雄物川流域に該当するデータを抽出し、それらに対して流域内に存在するアメダス観測点を参照値としたダウンスケールおよびバイアス補正を実施する。				
2：降雨流出氾濫モデルによる数千年単位の河川流量ならびに浸水リスク推計・渇水リスク推計				
1により得られたデータセットを入力値として降雨流出氾濫モデル(RRI)により河川流量および浸水氾濫推計を行う。増額分として水資源モデル(SiBUC)により河川流況および渇水リスクを推計する。				
3：現在・将来気候下の河川流量の統計的性質の把握				
2により得られた数千年単位の河川流量推計結果を基に、現状の計画規模を含めた数百年に 1 度の規模で生じる河川流量とその予測の幅について推計を行い、既存の推計結果との比較を行う。将来予測実験に関しては各 SST パターン下での河川流量推計結果を基に、気候変化下での洪水リスクを推計する。得られた結果と現在の主要な気候変化影響評価手法である降雨を定数倍する簡易的な手法から得られる結果の差について明らかにする。得られた結果を地方整備局と共有し、現状の河川計画の延長として得られた結果を活用する方法やそのために必要な改良および精度検証を実施する。				
4：深層学習に基づく浸水予測モデル・エミュレータの開発				
3により得られた数千年単位の河川流量推計結果を基に、深層学習技術により降雨流出氾濫モデルのエミュレータの構築に取り組む。事務所における標準的な計算環境で実行可能なソフトウェア及び関連ツールの作成を行う。				

⑥研究成果

1. 降雨流出氾濫モデル実験に適したバイアス補正データセットの整備 (増額分：水循環モデル実験に適したバイアス補正データセットの整備)

気候モデルから得られる降水量にはバイアスがあることが広く知られており、降雨流出氾濫モデルの入力として用いるためにはバイアスを適切に取り除く必要がある。したがって本研究開発ではまず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)のバイアス補正データセットの開発に取り組んだ。日本域ダウンスケール版の d4PDF は現在再現実験 60 年×50 アンサンブル(3000 年)、全球平均気温 2 度上昇実験 60 年×9 アンサンブル (540 年×6SST パターン)、全球平均気温 4 度上昇実験 60 年×15 アンサンブル (900 年×6SST パターン) 存在する。このデータから雄物川流域に該当するデータを抽出して降雨流出氾濫モデルと水循環モデルに適したデータセットを開発した。

本研究開発においては高水解析と低水解析で異なるアプローチを行った。高水解析においては地点データである AMeDAS 観測値をバイアス補正の際の参照値とした。この際メッシュデータである d4PDF の予測結果を AMeDAS 観測点の情報にダウンスケーリングした。この解像度変換は対象とする AMeDAS 観測点の近傍 4 点の d4PDF の値を距離の逆数の 2 乗で重みづけ平均を行った。本研究では渡部らによる Dual moving window バイアス補正 (以降 DWM 法と記す) を適用した。低水解析においては放射関連変数等を観測値として入手することが困難であるため再解析データである DSJRA55 を補正の参照値として用いることでモデルバイアスの補正を行った。再解析データはモデル出力値であるため地点データではなくメッシュデータである。このため低水解析においてはメッシュデータに対してバイアス補正を行った。再解析データである DSJRA55 の降水量自体もモデル出力値であることから一定のバイアスが存在することが知られている。そこで、DSJRA55 の日降水量が、観測値を基に作成されたメッシュデータである APHRODITE-2 のプロダクト APHRO-JP の日降水量と一致するように補正を行った。さらに積雪域においては雨量計による捕捉率の問題があるため既往研究を参考に捕捉率補正を適用した。

以上より、d4PDF の日本域ダウンスケール版の現在実験および将来予測結果 (全球平均 2 度、4 度上昇) の数千年相当のデータに対して、将来予測に重要となる 6 つの SST パターンを独立して扱ったデータセットの整備が完了した。このデータは本研究開発が対象とする雄物川流域のみならず他の流域や他の将来予測結果にも利用可能である。次章以降で説明する本研究と同様の解析を日本各国で行うための基礎となる手法が確立した。

2. 降雨流出氾濫モデルによる数千年単位の河川流量ならびに浸水リスク推計 (増額分：水循環モデル実験に適した将来河川流況および浸水リスク推計)

上術のデータセットを入力値として河川流量の推計を行った。河川流量の推計においては洪水流量とそれ以外で異なる推計方法を行った (図 1)。これは洪水流量の推計とそれ以外の河川流量を推計する数値モデルとは独立して開発されていることを踏まえている。洪水流量推計は数日や数時間など降雨が生じた時間のみに着目した実験を行う設計となっており、多くの数値モデルにおいては降水量のみを入力とする。一方でそれ以外の通年の河川流量の推計を行う際には、蒸発散や融積雪の推計が重要であり、必要となる変数も降水量以外に気温や放射、風速、気圧、湿度など多数となる。本研究では洪水氾濫に関しては降雨流出氾濫 (RRI) モデル、それ以外の通年の河川流量に関しては陸面過程モデル SiBUC を用いた実験を行った。

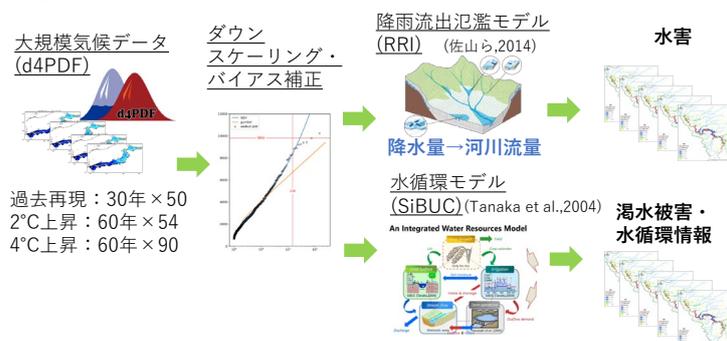


図 1 実施実験概略

本研究で用いた RRI モデルの氾濫解析における主要地点の流量及び浸水域の再現性は既に既往研究により十分であることが確認されているが、本研究においても氾濫が発生しない条件でのピーク流量の再現性について確認した。過去に洪水が発生した三事例を対象として氾濫戻し流量(1987年8月(4230 m³/s)、2002年8月(3690 m³/s)、2013年7月(3520 m³/s))と推計結果を比較したところ、それぞれの誤差は-14%、-31%、3%であった。本研究ではアメダス観測点の降雨のみ用いていること等を踏まえると、妥当な範囲内の誤差であると判断した。

水循環推計のための SiBUC モデルの検証に関しては、バイアス補正の際の参照値である DSJRA-55 (ただし、日単位降水量は APHRODITE により補正) を入力値とした実験を行いその結果を樺川地点における河川流量と比較した。なお、ここでの SiBUC 実験においてはダムや取水を考慮していない。つまり、河川流量とは厳密に一致するものではないことに注意が必要である。図 2 は 1999 年から 2003 年の 5 年間を対象とした実験結果である。11 月から 2 月の降雪時期の流量と 7 月から 10 月の出水期の流量がいずれも過少となっているが、4 月における融雪に伴う流量の増加については再現性が高いことがわかる。図 2.2-4 は同期間の流量の時系列図である。機関全般を通じて流量の少ない時期に関して、モデル推計結果が観測値を下回っている。これらの原因としては第一にダムによる調整がない点が挙げられる。観測値における流量はダムの操作の影響を受けたものであり、流量が平準化されるような調整が行われているがこの点は今回のモデル上では再現されていない。このように、いくつかの点においてはモデルにおける実験設定と現実の差異から生じる差があるものの、以降の将来変化倍率推計に支障をきたさない範囲の過去再現性を有したモデル推計を雄物川流域において実施することが可能となった。

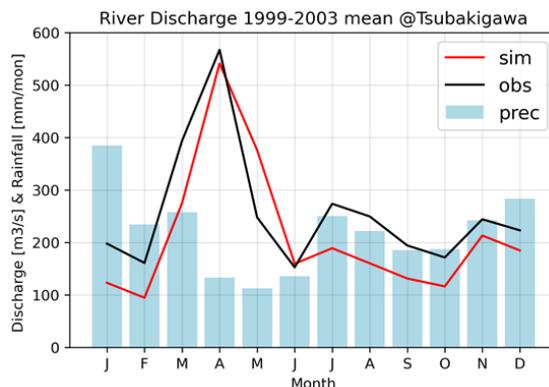


図 2 1989 年から 2003 年の月別流量平均値

3. 現在・将来気候下の河川流量の統計的性質の把握

(増額分：水循環モデル実験に適した将来河川流況および渇水リスク推計)

河川流量の統計的特徴の把握として、現在における数年に 1 度規模の稀な出水および低水がどのような性質を持つかに着目し解析を行った。年最大となる降水イベントを対象に実施した RRI モデル実験結果からは、数年に一度規模の出水に関連した将来変化倍率を求めた。提言においては河川流量の倍率が全球 4℃ 上昇相当において 1.4 倍と示されている。これに対して各流域の特徴を踏まえた解析として、1) 1 年から 300 年という再現期間による違い、2) SST パターンによる違い、3) 上下流による違いを推計した。通年を対象とした SiBUC による実験では河川流況として、平水、低水、渇水の各流量指標について将来変化倍率を求めた。また、雄物川が位置する東北地方においては温暖化により降融雪量が大きく変化することが予測されている。この点を踏まえ、各月の流量に関して平年値および 60 年に 1 度の値 (1 アンサンブル実験において最低・最大となる値) を求めることで融雪による流量が多いと考えられる春から初夏の流量に関する将来変化倍率を推計した。

複数の降雨継続時間と再現期間における将来変化倍率を求めた結果から、各降雨継続時間と再現期間における変化倍率の平均に関しては提言により示された 1.4 倍と近い値となることが明らかとなった。本実験において提言における推計が再現できていることが示された。再現期間の異なる違いとしては、より低頻度 (長い再現期間) の結果において SST パターンによる予測の幅が大きいことが明らかとなった。降雨継続時間に関しては 48 時間のものがやや他の時間よりも低めの倍率となったがそれ以外に明確な差は見られなかった。

次に SST パターンの違いにより生じる将来変化倍率の差について求めた結果 (図 3) からは、特に

低頻度（再現期間が長い）ほど SST パターンによる差が大きいことが示された。今回扱った d4PDF の 6 つの SST パターンのうち、MI は再現期間が長くなるほど将来変化倍率が大きくなった。MI ほど顕著ではないものの MP においても同様に再現期間が長くなるほど将来変化倍率も大きくなった。一方で、CC では逆に再現期間が長くなるほど変化倍率が小さくなっており、HA や GF においては再現期間の長さに関わらずおよそ一定の将来変化倍率を示した。MR はほぼ 6 つの SST パターンの平均値と同様の変化を示した。この結果より SST パターンについて理解を深めることが将来変化倍率の推計に重要であることが改めて示された。このように将来変化倍率における SST パターンの重要性が占められたことから、詳細な解像度にダウンスケーリングして行われる実験においては SST パターンを考慮することに留意しなければならないことが明らかとなった。

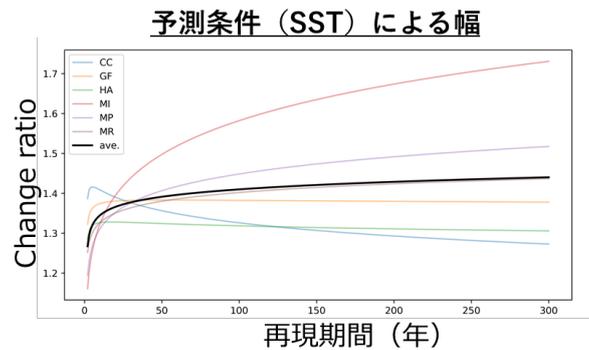


図 3 各 SST パターンにおける河川流量将来変化倍率

地点による違い、すなわち上下流による将来変化倍率の違いについて調べた結果(図 4)からは、基準地点である樺川地点における各再現期間の SST パターン間での平均値は 1.4 倍と提言に示した値と同程度の値となる一方で上流に位置する大曲橋および雄物川橋においてはそれぞれ平均値において 0.2 ~0.5 程度大きな倍率となることが明らかとなった。大曲橋および雄物川橋においては平均値が大きくなるのみならず、SST パターンによる予測の幅や、再現期間が大きくなることに伴い将来変化倍率が増加するという傾向も明らかとなった。本解析により地点により将来変化倍率の傾向が大きく異なるということが明らかとなった。提言における値に関して、流域によりその傾向が異なるという点に加えて、流域の中でも上下流における差について留意すべきであることが明らかとなった。

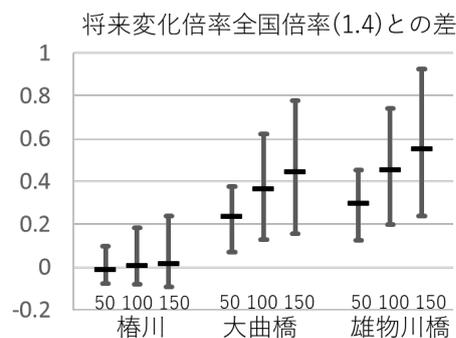


図 4 各対象地点別の河川流量将来変化倍率

低水解析に関しては各 SST パターンにおける全期間の実験結果（2℃上昇実験 60 年×9 アンサンブル、合計 540 年相当、4℃上昇実験 60 年×15 アンサンブル、合計 900 年相当）の平均値および 60 年に 1 回、つまり 1 アンサンブル実験における最小値を各月に対して求め、現在実験（30 年×50 アンサンブル、合計 1500 年）で求めた同様の値と比較した。結果より 1 月から 2 月にかけて現在気候において降雪である現象が降雨となることで流量が増加すること、さらに 4 月から 6 月にかけて現在気候下では融雪による流量増加が将来は減少することから流量が大幅に減少することが明らかとなった。夏季については減少の傾向が見られるがその SST パターンによる予測の幅は大きかった。また 3 月については 2℃上昇実験では増加が示されているが 4℃上昇実験では減少に転じている。昇温に伴い流量の増加時期が異なっていることが示された。平水流量、低水流量、濁水流量について各 SST 別で示した

結果（図 5）からは、2℃上昇実験においては SST パターンの平均で 1 割から 2 割程度の減少となること、一部の SST パターンにおいて増加となること、より稀な値であるほど減少が明らかであることが示された。4℃上昇実験においてはすべてが大幅な減少となり、渇水流量では 4 割程度の減少となった。渇水流量と比べても、低水流量に関する SST パターンによる幅が大きいという傾向が見られた。

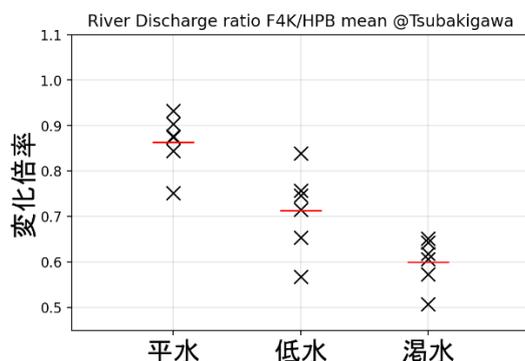


図 4.3-1 各流況指数の将来変化倍率（全球平均 4 度上昇時）

4. 機械学習に基づく浸水予測モデル・エミュレータの開発

（増額分：機械学習に基づく水循環モデル・エミュレータの開発）

災害対策には降雨イベントに対する浸水の空間分布推定が重要である。しかしながら、RRI モデルなどの物理方程式に基づく数値モデルによる詳細な計算には計算時間を要する。本研究では、深層学習技術を用いて、実行計算コストの軽微な降雨流出氾濫モデルのエミュレータを開発した。このエミュレータは降雨の空間・時間分布から降水イベントの最大浸水深を予測するものである。学習器には深層畳み込みニューラルネットワークを使用した。入力データはアメダス観測点でバイアス補正した 13 地点における 168 時間の時系列データであり、出力データは RRI の計算した最大浸水深の二次元分布である。まず学習器の汎化性能を上げるため、入力・出力データについて、次元圧縮を試みた。畳み込みオートエンコーダと主成分分析法の二つの異なる次元削減手法を比較したところ、畳み込みオートエンコーダの方が二乗平均平方根誤差 (RMSE) を小さくできることが新たに分かった。入力データについては時系列の特徴を、出力データについては浸水深分布の特徴を畳み込み層で効率よく学習できることに加え、活性化関数による非線形な変換が有効であることが分かったといえる。そのうえで、次元圧縮される入力・出力データの特徴量をニューラルネットワークで結合するネットワーク構成とした。最大浸水深の深い地点（以下、A 点）について、学習器の予測精度は RMSE が 18 cm、決定係数 (γ) が 0.95 であった（図 5.3-1）。A 点に対して回帰学習器のアンサンブル学習させた場合（RMSE=30 cm、 $\gamma=0.81$ ）よりも精度が大きく向上した。アンサンブル学習をさせた回帰学習器では、対象地点(A 点)のみを予測するモデルであるが、今回構築した学習器は 2 次元分布が出力可能であることを確認した。

水循環モデルである SiBUC についても、より得られた長期間の実験結果を基に、各種気象変数から月単位の河川流量を予測するエミュレータの開発を行った。具体的には融雪による流量の増加が生じる 3 月、4 月、5 月の椿川地点における月単位河川流量を同一年内の気温、降水量、気圧、比湿、下向き長波放射、下向き短波放射、風速から求めるエミュレータを開発した。機械学習手法の適用に際して、各種気象変数を月単位で用いる場合と日単位で用いる場合を試したところ精度について月単位推定の方が日単位推定よりも良いという結果が得られた。また各種気象変数についてはそれぞれ値が大きく異なることから値を平準化することで精度を向上させる必要があることが明らかとなった。月単位の各種気象変数から月単位の流量を推定する学習に関する交差検証を複数の学習モデルより行った結果では今回、3 月の結果と 4 月と 5 月の結果で良い結果を示す手法の傾向が異なった。得られた決定係数も 3 月が 0.8 を超える一方で、4 月と 5 月に関しては 0.7 程度であった。交差検証における 1 事例について予測結果と正解について記した散布図が図 5.4-2 である。3 月における Gradient Boosting Regressor の結果、5 月における Bayesian Ridge の結果共に大きな流量に関しては過少推定、小さな流量に関しては課題推定となっており、稀な事例に対する再現性の向上が課題となっている。なお、ここでは機械学習手法を比較する Pycaret におけるデフォルトの設定を用いており、パラメータ設定や事前データ処理により更に精度向上の余地は残ることを踏まえると、エミュレータとして十分活用の

余地があることが示されたと考えられる。

さらに、洪水予測への活用が期待される水文モデルの一つである RRI モデルにデータ同化を適用し、河川の水位・流量等予測の高度化を進めた。データ同化を水文モデルに適用した既往研究はあるが、状態量の限定的な推定や、手法・計算量などの課題が残っている。本研究では、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を使用して、水位予測への効果や、状態量推定の精度改善が見込まれる共分散緩和や局所化の手法についても実験を行った。まず、EnKF によって RRI モデルの状態を更新可能か、そして各手法のパラメータについて探索した。調査の結果 RRI モデルは他励系であり、誤差が発展しづらいため、初期値のわずかな違いは出力にほとんど影響しないことが分かった。そのため、適切なアンサンブルスプレッドを保つために、降雨データに摂動を付与する方法が適していることが分かった。共分散緩和では、RTPS よりも RTPP の寄与が大きく、精度の改善が見られた。同様に局所化を適用することでも精度の改善がみられ、局所化の手法(距離に基づく方法、状態変数の相関に基づく方法)による精度の優位差は見られなかった。上記の降雨の摂動、共分散膨張、局所化の手法、そして適切なパラメータにより、予測水位の誤差を最大 1m 以上改善するシステム構築が出来た。

⑦研究成果の発表状況・予定

本田洋平, 渡部哲史, 知花武佳, 山田真史, 阿部紫織, 菊地純, 斉藤健, 伊藤俊介, 藤沢直志, 池内幸司, 大規模気候予測情報に基づく河川流量将来変化倍率の幅に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol77(2) I_175-I_180, 2021.

小槻峻司, 桃井裕広, 菊地亮太, 渡部哲史, 山田真史, 阿部紫織, 綿貫翔, 回帰学習器のアンサンブル学習による降雨洪水氾濫モデル・エミュレータ, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol76(2) I_367-I_372, 2020.

関本大晟, 渡部哲史, 小槻峻司, 山田真史, 阿部紫織, 綿貫翔, 降雨流出氾濫モデル・エミュレータによる浸水範囲予測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol76(2) I_547-I_552, 2020.

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。)

該当なし

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑧⑨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。)

該当なし

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

- ・今後の課題：数千年相当の河川流量推計結果の活用

数千年単位の河川流量およびそこから推計した浸水リスクと渇水リスクの推計結果を河川計画や管理に役立てるための具体的な方法の検討をさらに進める必要がある。流量の将来変化倍率や降雨パターンの変化等の有益と考えられる情報と実務で用いられる情報との間には時空間解像度や精度等の観点で乖離がある。更に、数千年相当の河川流量推計には SST パターンによる違いなどにより将来推計結果が複数存在する。複数の値や予測値に幅がある点は既存の河川計画と大きく異なる点であり、これらを有効に活用するための方法は確立していない。本研究で得た知見が実務で真に活用されるためには、モデル推計と実務で必要とする値との差異を埋める方法、および、幅のある予測結果を河川計画に用いるための方法論の開拓が引き続き必要となる。

- ・課題：水循環・渇水推計の高精度化

水循環モデル実験結果からは多変量を扱う数値モデル推計の課題も明らかとなってきた。例えば下向き短波放射および長波放射については観測値が少ないため検証が困難である。同様に積雪や融雪に関しても推計の基となる放射関連の変数の精度検証の困難さに加えて、積雪量に関する観測の不足に関する点も問題となる。これらの改善が望まれる。

- ・展望：他地域への展開

力学的ダウンスケーリングを用いない本手法は他地域への適用が容易である。本研究ではバイアス補正データセットの作成およびモデル実験において他流域への展開を念頭に置いた技術開発を行った。気候変動に適応した治水対策の検討は全国各地で実施中あるいは今後実施されると考えられるためそれらの参考事例となることが期待される。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

- ・気候変動を踏まえた河川計画への反映

本研究により、産業革命前からの全球平均気温 4 度上昇及び 2 度上昇時における河川流量の推計が得られた。これは気候変動を踏まえた治水計画を行う上での基礎となる知見である。降雨の将来変化倍率による計画を一層具体化するために有益な情報である。本研究開発では数千年単位の河川流量およびそこから推計する浸水リスク、渇水リスクの推計を可能とした。これは両リスクへの対応の基本となる情報であり、本研究成果を河川行政へと反映できる点である。

- ・気候変動に対する理解の促進

本研究では将来変化倍率という形で浸水リスクおよび渇水リスクの変化を表現した。これは気候変動による変化を実感しやすい情報であり、気候変動の変化を身近にとらえることを助けるものである。気候変動に対する理解を促進することで河川行政の円滑な進捗に貢献することができる。

- ・エミュレータによる多様な降雨パターンとその下での流量の理解

降雨から流量を推計するツールは数多くある。また洪水に関する予報情報も利用可能である。しかしながら専門的な技術や計算機の必要性、さらには実行にかかる手間から、限られた人員・予算内で大量な降雨パターンに対する流量をそれぞれ得ようとする事は容易ではない。今後、降雨予想のアンサンブル化は進むと考えられるが、これらの活用には上述の課題が残る。本研究で開発するエミュレータは構築には専門的な技術や計算機を必要とするものの、構築後は簡便かつ高速に降雨から流量さらには浸水について推計する事が可能である。このようなツールは管理者が流域の洪水リスク特性について理解するための助けとなることが期待できる。