

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
	岡崎淳史（おかざきあつし）	千葉大学	准教授
③ 研究テーマ	名称 流域へのインパクトに基づく気候変動リスク情報創出に向けた技術開発		
③研究経費 （単位：万円） ※端数切り捨て。	令和 5 年度	令和 6 年度	合 計
	191 万円	191 万円	382 万円
④研究者氏名 （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		所属機関・役職（※令和7年3月31日現在）	
渡部 哲史		国立大学法人九州大学・准教授	
山田 真史		国立大学法人京都大学・助教	
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	
小槻 峻司		国立大学法人千葉大学・教授	
池内 幸司		一般財団法人河川情報センター・理事長	
⑤技術研究開発の目的・目標 （様式河提地-2、河提地-3に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）			
岩木川流域は、従来から洪水に悩まされてきた流域である。2022 年には記録的な大雨が発生しており、温暖化による影響が顕著な北東北においても特に注意すべき流域である。一方で近年は大規模な水害が発生していないことから、住民や自治体の洪水や渇水に対する危機感を高めることに課題を有している。気候変動の影響により起こり得る洪水や渇水について知ってもらうことが流域治水対策を進める上での鍵となっている。 流域や市町村レベルで気候変動対応策の検討を行う際には、それに応じた空間スケールの気候変動予測情報が求められる。日本では気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）が大規模気候変動予測データ d4PDF のダウンスケーリングを行い、高解像度のデータ整備を推進した。これにより、d4PDF（水平解像度 20km）では解像できなかった極端現象が捉えられるなど、その有用性が示されている。通常このような取り組みは計算量が膨大となるため、大量にある d4PDF のうち限られたシナリオについてのみダウンスケーリングが行われるが、対象とする流域にとって重要なシナリオが捕捉できているかは十分に検討されていない。膨大な d4PDF の中から流域にとって重要なものを抽出し、効率的なダウンスケーリングを可能にする手法が求められる。 本研究は、比較的解像度の粗い大規模気候変動予測データ d4PDF から流域にとって重要なイベントやシナリオを抽出する技術を開発する。流域に対する重要度という視点を新たに盛り込み抽出する事で、岩木川流域の市町村レベルで気候変動対応策策定の基盤となる気候変動予測情報・影響評価を開発・創出する事が可能になる。今後気候変動予測情報は加速的に増大すると考えられ、その中から流域管理に重要な情報を適切に選択することが課題となる。流域スケールでこれらの情報選択の技術を持つことは地域に根差した治水計画を整備する上での基盤となる。 上記目的達成のため、本研究では岩木川流域を対象に、次の 4 点に取り組んだ。①流域に適した水害インパクト設計、②低解像度大規模気候予測データから岩木川流域におけるインパクトを低コストに推計する手法の開発、③低コストインパクト推定器と低解像度大規模気候予測データを用いたインパクト推計。②については、超解像技術を用いて降水量を安価に高解像度化し、これを降雨流出氾濫モデル（RRI）に入力し、氾濫解析を実施することで実現した。			

⑥研究成果

(1) インパクト指標開発

りんごは青森県、特に岩木川流域の一大産業であり、日本で栽培されるりんごのおよそ半分が岩木川流域で栽培される。岩木川では河道内高水敷でもりんご栽培がなされている。流域内栽培面積の5%にあたる8.9 km²が岩木川高水敷で栽培されている。高水敷のりんご畑は出水時にたびたび浸水している。りんごは地域の重要な産業であるだけでなくシンボルでもあり、出水時にはメディアでも大きく取り上げられることも相まって、りんご畑の浸水は住民の大きな注目を集める話題である。

被災リスクの高い高水敷のりんご畑を巡り、近年、移転の議論がなされている。りんご畑の被災リスク軽減のため、流域自治体では移転に補助金を出すなどの支援をしている。りんご農家にとっては、移転により水害リスクからは解放されるものの、新たにりんご栽培好適地を見つけることは難しく、減収リスクを伴う。行政にとってはりんご畑が高水敷からなくなれば防護コストを削減できる一方、りんご畑があることで抑えられていた河道維持管理コストが新たに負担することになる。このような住民・行政双方のトレードオフも相まって、移転は十分に進んでいない。

これらの課題と、地域におけるりんごの重要性を考慮して、本研究では高水敷りんご畑の浸水頻度をインパクト指標とする。三世寺付近の高水敷は特にりんご畑としての利用が進む。一帯では水位が5~6mを超えとりんご畑が浸水することから、河川水位が6mを超える回数をカウントすることで、りんご畑浸水頻度を計算した。温暖化によって被災リスクがどのように変わるのかという情報が、移転の議論・判断の一助になることが期待される。

これらに加えて、流域全体を対象とする指標として、最大浸水深および浸水頻度も用いた。最大浸水深のマップは、各地点における浸水深のうち最大のものを合成することで計算した。つまり、最大浸水深は、単一のイベントで発生するものではない点に注意が必要である。浸水頻度は、床上浸水が発生するとされる0.5m以上を記録する浸水回数をカウントすることで計算した。浸水回数総数を全イベント数で除すことで、浸水頻度を計算した。

(2) 降水量超解像器開発

本研究では、画像処理の分野で研究開発されてきた超解像技術を気象データに応用し、降雨の空間パターンを高解像度化する技術を開発した。超解像とは、低解像度の画像を高解像度画像に変換する技術である。これまでに様々な超解像技術が開発されており、特に近年は機械学習を用いた手法が注目されている。超解像技術を用いて気象データを超解像することが可能となれば、解像度の粗いデータから高解像度のデータを得ることができる。本研究では、画像の超解像に用いられているSwinIRという手法を降水量に適用し、大規模気候データであるd4PDFを高解像度化する技術を開発した。

SwinIRによる超解像前後の一例を図-1に示す。超解像により降水の細かな空間パターンが復元されている。また、各降水域中心部により強い雨が復元されている。これにより、低解像データでは空間的に平滑化されることで弱まってしまう降水ピークが、超解像では適切に復元されている。これらの傾向はここで示す例にとどまらず広く確認することができた。線形内挿で高解像度化したものと超解像によるものを比較すると、MSE、BIAS、PSNR全ての指標で、超解像が優れた成績を示すことが確認された(表-2)。

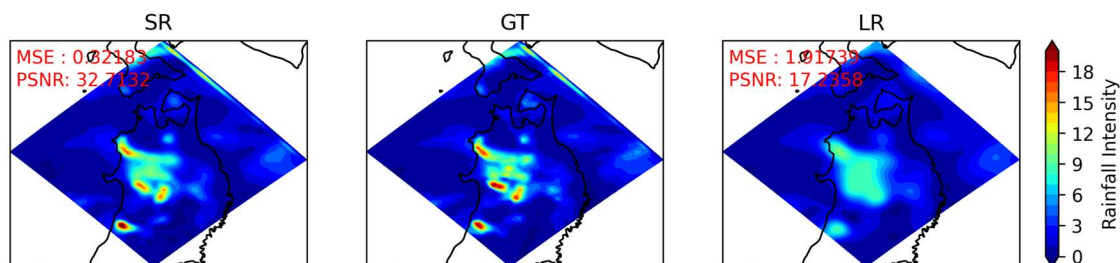


図 1 超解像器テスト時の時間降水量の例 (mm/h)。(左) 超解像の出力、(中) 正解、(右) 超解像の入力。

表-2 超解像による降水の復元精度

	MSE (mm/h)	BIAS (mm/h)	PSNR
SwinIR	0.1682	1.942×10^{-4}	29.35
線形内挿	0.5049	2.125×10^{-2}	20.97

(3) 降水量変化の力学的ダウンスケーリングとの比較

日本周辺領域版 d4PDF に含まれる全計算年（現在気候 3000 年・将来気候 5400 年）の年最大降水イベントを対象に超解像を実施し、極端降水量の将来変化を推計した。同様に、日本周辺領域版 d4PDF を力学的ダウンスケーリングした SI-CAT（現在気候・将来気候ともに 372 年）を用いた極端降水量推計も行った。以下、超解像により得られた降水データ及び氾濫解析結果を SRDS、SI-CAT のものを DDS と呼称する。

図-2 に五所川原集水域 24 時間積算雨量の相対頻度分布図を示す。まずは、高解像度化手法を比較をする目的で、DDS と SRDS で同様の計算年を用いて比較を行った。すなわち、DDS、SRDS 双方で現在気候・将来気候ともに 372 年分のデータを用いた比較である。SRDS の頻度分布（図-2 中）は DDS（図-2 左）と類似しており、SRDS が精度良く 20km 降水量を 5km に高解像度化していることが伺える。現在気候・将来気候ともに、100mm/h を超えるような雨の頻度は SRDS の方が高いことが確認できるが、超解像器の検証時には顕著なバイアスは見られなかった（表-2）。そもそも力学的ダウンスケーリング後の気象場は親モデルと同じであるとは限らず、一般に降水量や降水領域も一致はしない。従って、元データの降水領域を変えない超解像による降水は、力学的ダウンスケーリングとは必ずしも一致しない。図-2 各図右端の階級には 1、2 のイベントしか含まれていないことから、この程度の差異は許容範囲と考える。以上から、現在気候および将来気候について、統計的に SRDS が DDS をよく模倣できていると言える。

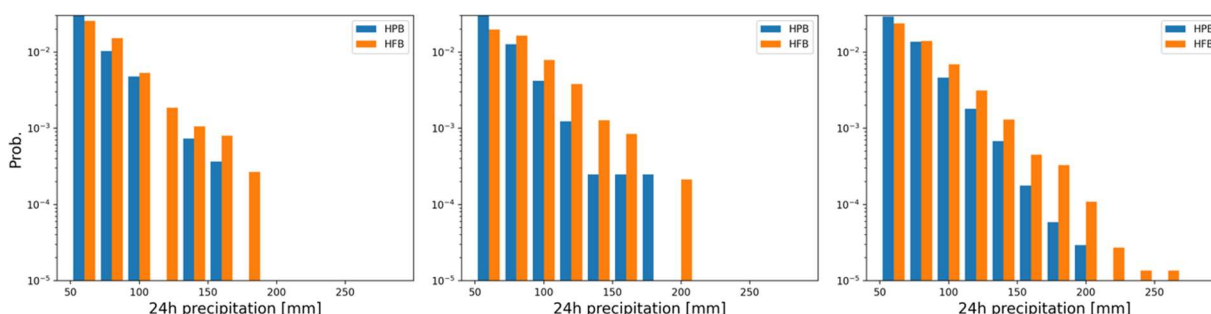


図 2 五所川原集水域における年最大日降水量の相対頻度分布図。（左）DDS、（中）DDS と同じ計算年のみを用いた SRDS、（右）全計算年を用いた SRDS。青は現在気候実験、橙は 4 度上昇将来気候実験であることを示す。

図-2 右には、全計算年を超解像した相対頻度を示す。図-2 右では、現在気候・将来気候の双方で、図-2 左、図-2 中よりも強い降水を捉えられていることが分かる。これは、とりもなおさず SRDS が多くのサンプルを含んでいるからである。DDS の頻度分布は、現在気候では 160 mm/d、将来気候では 200 mm/d 付近で途切れたような分布になっており、また階級値が存在しないものもある（図-2 左）。一方で、SRDS では強い降水強度まで頻度分布が連続的に変化する、もっともらしい結果を得ることができた（図-2 右）。

DDS と SRDS の降水量を一般化極値分布（GEV）に当てはめ、確率年に対応する降雨強度を求めた（図-3）。岩木川の計画規模である 1/100 確率規模の五所川原地点における計画降雨量は 192 mm/d である。一方、現在気候における DDS、SRDS の 1/100 降水量はそれぞれ、117 mm/d、129 mm/d であり、双方ともに計画雨量よりも小さい。これはモデルバイアスによるものと考えられる。本稿では、超解像が力学的ダウンスケーリングをどれほどうまく模倣できるかという点に興味があるため、モデルバイアスは興味の対象外であるが、今後は適切にバイアス補正を実施する必要があるだろう。

DDS と SRDS を比較すると、図-2 と同様に、現在気候・将来気候の双方で SRDS の方が DDS より降水量が大きい。一方、将来気候における確率雨量を現在気候のもので除した値である変化倍率は、それ

ぞれ、1.26 倍、1.21 倍であり、「気候変動を踏まえた治水計画の在り方」(1.2 倍)とほぼ同等の値が得られた。換言すれば、超解像でサンプル数を増やすことの利点は、変化倍率という見方では確認できなかった。

(4) 流量変化の力学的ダウンスケーリングとの比較

SRDS と DDS の降水量を入力に、RRI を用いて流出解析を行った。一例として、図-4 に現在気候実験のメンバー1、1985 年の年最大降水イベントにおける積算降水量と、五所川原地点集水域におけるハイエトグラフ及びハイドログラフを示す。

超解像の入力の違い(訓練時は SI-CAT を 20km に内挿したもの、本番は日本周辺領域版 d4PDF)を受けて、高周波成分の変動に乏しい降水パターンが SRDS には見られる。ハイエトグラフからは、SRDS が 75h 付近の強い雨を過小評価している様子がわかる。超解像器の学習を効率的に進めるために、降水量を最大 20 mm/h に規格化する処理を学習時に行っていることが原因と考えられる。一方、流量を見ると、SRDS を入力に用いた場合でも、DDS を入力に用いた場合とほぼ同じハイドログラフが得られた。河川流量は、流域内各地点における降水量を積み込んだものと捉えることができるため、細かな空間スケールの降水再現性に強くは影響を受けなかったものと考えられる。なお、3. (2)節で述べたように、SRDS と DDS の年最大降水イベントは必ずしも同一ではなく、同一であった場合でも力学的ダウンスケーリングにより雨の量・場所ともに異なることもあるため、直接的な比較は難しく、本論文ではこれ以上立ち入らない。

五所川原地点における年最大流量を GEV に当てはめ、各再現期間にあたる流量を求めた(図-5)。五所川原地点における基本高水のピーク流量は 5,500 m³/s であるのに対して、SRDS と DDS の現在気候 1/100 確率流量は 1,640 m³/s、2,080 m³/s であり、基本高水より大幅に小さい。これは RRI の入力である降水量が過小評価されていることによる。

温暖化による流量変化倍率はそれぞれ、1.55 倍、1.59 倍であり、提言における 4 度上昇時の倍率(1.4 倍)よりも大きな値を示す。提言では、既存の降雨波形に降雨の温暖化変化倍率を乗じたものを流出モデルに与えることで流量の変化倍率を計算している。提言と同じデータを使用しているにも関わらず変化倍率が一致しないのは、計算方法の違いによるものである。本研究のように降水パターンの変化を考慮して計算することで変化倍率が大きくなるのは興味深い、本項の目的から外れるため、ここでは触れない。SRDS と DDS の流量変化倍率はおおよそ等しく、降雨量の変化倍率と同様、超解像でアンサンブル数を増やすことの利点は、変化倍率という見方では確認できなかった。

1/100 確率流量は、現在気候でも将来気候でも、SRDS の方が DDS よりも小さい。降水量については SRDS の方が DDS より大きな値を示していたため、降水量と流量は逆の傾向を示している。このことは、流量に重要な、量によらない降水の特徴を、超解像が捉えられていない可能性を示唆する。実

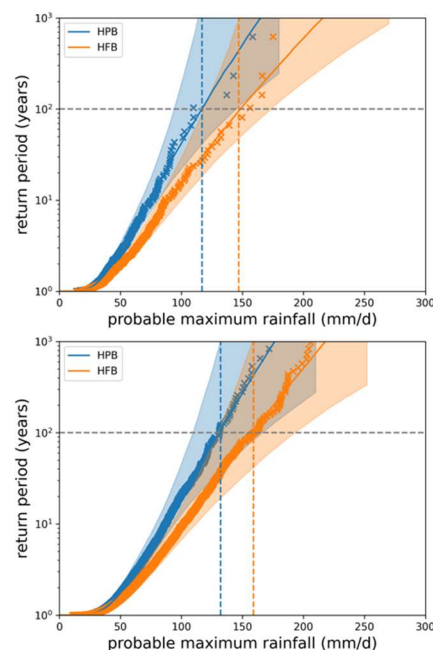


図 3 五所川原集水域における確率年と降雨強度(mm/d)。(上)DDS,(下)SRDS。青は過去実験、橙は将来実験。シェードは 95%信頼区間、実線は中央値を表す。縦破線は 1/100 確率雨量を示す。×印はカナン公式を用いたプロット位置。

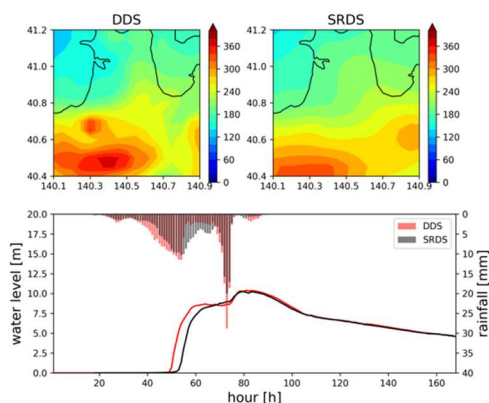


図 4 現在気候実験のメンバー1、1985 年の年最大降水イベントの(左上)DDS、(右上)SRDS における積算降水量の空間分布と、(下)五所川原地点におけるハイドログラフ。黒線は SRDS、赤線は DDS。

際、降水量と流量は一对一の対応関係にはなく、時空間的降水パターンの重要性が指摘されている。図-4 に示したような高周波成分に欠ける空間パターンや、20 mm/h を超えるような降水を復元できないことが、流量の過小評価の原因である可能性はあるだろう。

図-6 に五所川原地点集水域における年最大日降水量と、対応する降水イベントのピーク流量の関係を示す。図には、DDS と同じ計算年だけを超解像したものを用いた場合（図-6 上）と、全計算年を用いた場合（図-6 下）をそれぞれ示している。図-6 上から、同等の降水量に対する流量は、中央値、最大値ともに DDS より SRDS の方が小さいことが分かる。また、同等の降水量に対して取り得る流量の範囲も SRDS が狭い傾向が見て取れる。このことは、先に述べた通り、SRDS の降水パターンは流量の過小評価に繋がるものが多いことを意味する。以上から、SwinIR を用いた超解像は流量を過小評価する傾向がある事は明らかである。

図-6 上と図-6 下の比較から、サンプル数を増やす効果を見出すことができる。全計算年を使った場合、同等の降水量に対して DDS よりも SRDS の方が広い範囲の流量を取り得ることが分かる。この傾向は特に強い雨に対して顕著である。さらに、降水量自体もより広い範囲が含まれている。結果として、SRDS ではより多くの可能性を考慮できている。同様の傾向は、現在気候・将来気候の双方で、また浸水面積などでも確認できた。

以上から、超解像によって得られた降水量を用いて計算された流量は、過小評価される傾向があるものの、超解像によって安価かつ大量の降水イベントを高解像度化することで、甚大な被害をもたらし得るより大きな流量を含む、多様な洪水パターンを考慮できると言える。

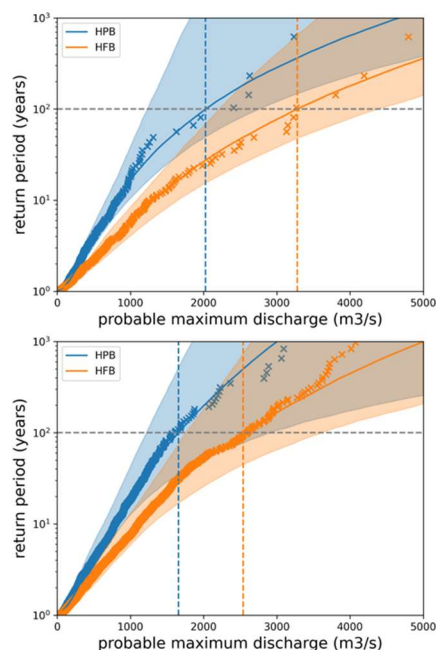


図 5 五所川原における確率年と年最大流量 (m^3/s)。(上) DDS、(下) SRDS。青は過去実験、橙は将来実験。シェードは 95%信頼区間、実線は中央値を表す。縦破線は 1/100 確率流量を示す。×印はカナン公式を用いたプロット位置。

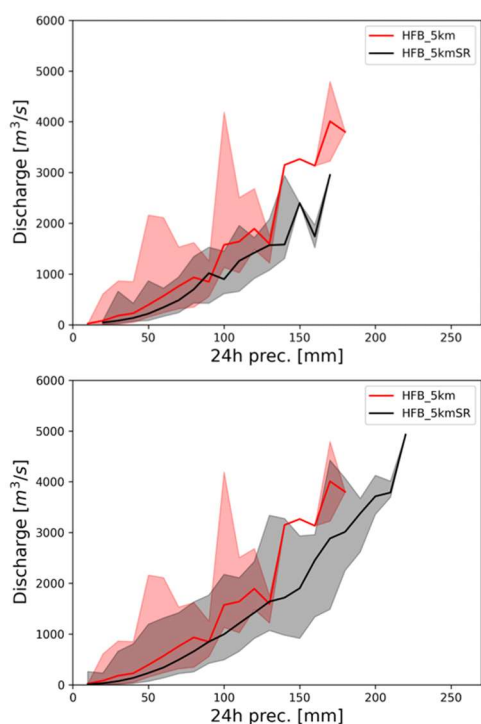


図 6 4 度上昇将来気候の五所川原地点における集水域平均降水量 (mm/d) と流量 (m^3/s) の関係。赤は DDS で (上) (下) で同じ。黒は SRDS で、(上) DDS と同じ計算年のみを用いたもの、(下) 全計算年を用いたもの。降水量 (ビン幅 10mm) ごとに流量を集計し、各ビンの中央値を実線、最大値・最小値をシェード上端・下端で示す。

⑦研究成果の発表状況・予定

・学術誌へ投稿中の論文

岡崎 淳史, 渡部 哲史, 山田 真史, 阿部 紫織, 小槻 峻司, 池内 幸司, 超解像を用いた大アンサンブル気候予測情報活用可能性の評価, 土木学会論文集特集号(水工学) (投稿中)

・学会発表

Kaneko, R., Shimabukuro, T., Okazaki, A., Kotsuki, S., Precipitation super-resolution using diffusion model with d4PDF, JpGU Meeting 2025, 25-30 May, Chiba, Japan.

Shiojiri, D., Muto, Y., Okazaki, A., Kotsuki, S., Estimating precipitation patterns from gauge observations using analog offline ensemble data assimilation, AGU24, Washington, D.C., 9-13 Dec. 2024.

Shiraishi, K., Muto, Y., Okazaki, A., Kotsuki, S., Downscaling Precipitation Data using Convolutional Neural Network Coupled with Wasserstein Generative Adversarial Networks, AGU24, Washington, D.C., 9-13 Dec. 2024.

Shiraishi, K., Muto, Y., Okazaki, A., Kotsuki, S., Downscaling precipitation data using convolutional neural network coupled with Wasserstein generative adversarial networks, JpGU Meeting 2024, 26-31 May 2024, Chiba, Japan.

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。)

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。)

なし

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発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、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本技術研究開発は、水害インパクト指標を提案するとともに、SwinIR という超解像手法を用いて、大規模気候データである d4PDF の降水量を高解像度化し、これを用いて氾濫解析を行うことで、岩木川における水害インパクトを簡便かつ信頼度高く推計することを可能にする技術を開発した。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河川計画に活用する方法論の開拓を行った。超解像が降水量を過小評価する傾向により、限られたサンプルを用いたインパクト推計と大きく異なる結果は得られなかったが、AI 技術を用いることでより多くの降水パターンを考慮することで、幅広い可能性を考慮する方法論を開拓することができた。

超解像による降水量を用いた河川流量が過小評価されることは今後の課題として残る。しかしながら、近年続く AI 技術の飛躍的発展は今後も継続すると考えられ、当課題はいずれ解決される可能性が高い。そのような流れにおいて、本技術研究開発のような方法論を開拓したことには大きな意義があると考えられる。本技術研究開発によって、高解像予測のアンサンブル数を増やすことが可能になった。これにより、岩木川流域にとどまらず、全国の流域において網羅的な温暖化影響評価が可能になる。適応策の立案・実施者からは最悪シナリオに対するニーズがあるが、大アンサンブル情報を余すことなく活用し、多様な可能性を考慮することで、そのような検討も可能になる。気候変動適応に向けこれらの情報の一層の活用が望まれる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発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。)

気候変動により頻発化・激甚化が懸念される水害や渇水への対応が求められている。また、これらの課題解決に向けた流域治水の推進は河川整備・管理において重要な課題である。本研究成果は水害に関するリスク情報を流域に及ぼす影響という新たな観点から整備するものである。気候変動影響は気候変動に関する研究プログラムなどの成果を基に分析されているが、その利用には河川整備や管理という観点はあまり反映されていない。本研究は流域へのインパクトを基に河川整備や管理の観点から気候変動に課する情報を選択的に得ようとする試みと言える。

本研究開発により、軽量に既存の大規模温暖化予測情報を高解像度化することが可能になった。これにより、計算量の制限により現在は一部しか高解像度化されていないこれらの情報を余すことなく利用することが可能になり、より不確実性を低減した温暖化倍率を設定することが可能となる。このような取り組みは岩木川流域のみならず全国展開が容易に行える。流域治水への機運の向上に資するものであり、この点において全国各地の河川整備・管理に反映しうる研究成果と言える。