

北海道における気候変動に伴う 洪水外力の変化

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON FLOOD RISK IN HOKKAIDO

山田朋人¹・星野剛¹・舩屋繁和²・植村郁彦²・吉田隆年²・大村宣明²・山本太郎³・
千葉学³・戸村翔³・時岡真治⁴・佐々木博文⁴・濱田悠貴⁴・中津川誠⁵

Tomohito J. YAMADA, Tsuyoshi HOSHINO, Shigekazu MASUYA, Fumihiko UEMURA, Takatoshi
YOSHIDA, Noriaki OMURA, Taro YAMAMOTO, Manabu CHIBA, Sho TOMURA, Shinji
TOKIOKA, Hirofumi SASAKI, Yuki HAMADA and Makoto NAKATSUGAWA

¹ 北海道大学大学院 工学研究院 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² (株) ドーコン 水工事業本部 河川部 (〒 004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4-1)

³ 一般財団法人 北海道河川財団 企画部 (〒 060-0807 札幌市北区北 7 条西 4 丁目 5-1 伊藤 110 ビル)

⁴ 国土交通省北海道開発局 建設部 (〒 060-8511 札幌市北区北 8 条西 2 丁目)

⁵ 室蘭工業大学大学院 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In August 2016, 4 typhoons sequentially attacked Hokkaido region within 2 weeks and caused severe flood damage. Because this sequential typhoon attack is the first time in recorded history and remarked maximum rainfall amount on many observatory in Hokkaido region, it became one of a trigger that led river administrators to consider flood risk change associate with climate change. This study developed a method which can evaluate flood risk under both past and 4K warmer climate condition and applied to 2 river basins (Tokachi and Tokoro river basins) in Hokkaido by using a large ensemble simulation dataset. The results show annual maximum rainfall and flood risk under warmer climate conditions are bigger in both of two river basins.

Key Words: *flood risk assessment, climate change, large-ensemble dataset, d4PDF, adaptation*

1. はじめに

北海道では近年、線状降水帯や台風による豪雨が頻発しており、その傾向の変化も指摘されている^{1),2)}。この一方で、温暖化が進行した際には年最大クラスの降雨量は全国的に増加し、その増加率は北日本においてより大きいことが複数の予測結果より示されている(例えば^{3),4)}。

2016年8月、北海道では観測史上初めての1週間に3個の台風が上陸し、その後の台風第10号の接近により全道各地で記録的な大雨が発生し、氾濫や橋脚の流出などの被害が広域的に発生した。この洪水後に国土交通省北海道開発局および北海道が設置した委員会⁵⁾は「気候変動による将来の影響を科学的に予測し、具体的なリスク評価をもとに治水対策を講じるべき」ととりまとめ、この意見を踏まえて国土交通省北海道開発局および北海道は「北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会」⁶⁾を設置し、将来の洪水リスクの検討がなされた。このように今後の洪水対策を考える上で、将来の洪水リスクをいかに評価するかが重要かつ喫緊の課題となっている。

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(例えば⁷⁾)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、降雨をもたらす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分布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洪水外力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十勝川帯広基準地点集水域（十勝川流域）および常呂川北見基準地点集水域（常呂川流域）に適用し、洪水外力を評価した。

2. 洪水リスクの評価手順

本研究で提案する洪水外力の評価手法は大量アンサンブル気候データを用いる。本研究では「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)」⁷⁾の領域実験を使用する。d4PDF領域実験は領域気候モデルにより作成された水平解像度20 kmの気候予測データであり、長期観測データが得られる1951年から2010年の60年間を対象に初期擾乱を発生させた50メンバの数値計算を実施した過去実験(60年×50メンバ=3000年)、産業革命前から全球平均温度が4℃上昇した世界を想定し、6種類の海面水温パターンと初期擾乱を与えた15メンバの数値計算を実施した4℃上昇実験(60年×6海面水温パターン×15メンバ=5400年)で構成される。

十勝川流域および常呂川流域への適用を例に洪水外力の評価手順を以下に示す。

(1) 大量アンサンブルデータからの大雨事例の選定

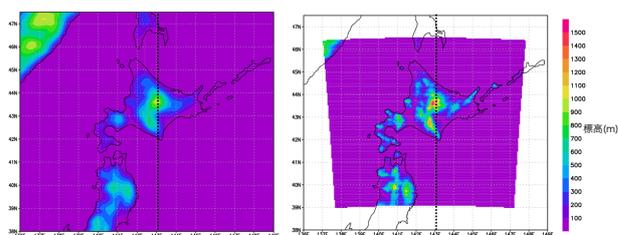
はじめにd4PDF領域実験の過去実験(計3000年)、4℃上昇実験(計5400年)における各年での6月1日から12月1日までの期間で計画降雨継続時間における流域平均降水量が最大となる降水イベントを選定する。計画降雨継続時間は十勝川流域で3日、常呂川流域で1日である。以下ではこの定義により選定された降水量を年最大降雨量として扱う。

(2) 力学的ダウンスケールによる降雨分布の高解像化

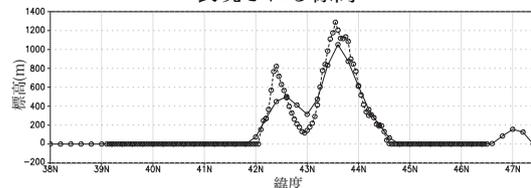
次に、流域形状および地形形状をより忠実に反映した降雨量情報を作成するため、各年での水平解像度20kmから得られた年最大降雨イベントを力学的ダウンスケールリング(DS)により水平解像度5 kmへと変換する。水平解像度20 kmと水平解像度5 kmで取り扱われる地形形状を図-1に示す。同図より、水平解像度5 kmでは地形起伏がより細かく反映されていることがわかる。

DSにはd4PDF領域実験の作成に使用されたモデルである気象研究所非静力学地域気候モデル(NHRCM)を用いた。DSの対象領域は図-1(a)右の着色範囲である北海道周辺の800×800 kmとした。DSの対象期間は前項で求めた各年での年最大降雨量の発生期間を含む15日間とした。膨大なアンサンブルメンバ(計8400年)を対象とするため、効率的なDSの条件設定が必要であり、20 kmメッシュで存在する総観規模の気象場の不安定に起因した豪雨事例のみをDSの対象とした。

このようなDSの対象期間の設定は水平解像度20km



(a) 左：20 km 解像度で表現される標高，右：5 km 解像度で表現される標高



(b) 経度 143 度での縦断標高図(実線が 20km 解像度，破線が 5km 解像度を表す)

図-1 解像度による標高の表現の違い

では確認できずDSを実施した際に発生する大雨を検出できない。これは、同手法により得られた降雨量が必ずしも年最大流域平均雨量とならないことを意味する。しかしながら、一部のアンサンブルメンバにおいて通年のDSを実施し、十勝川では全体の73%以上(上位17%の大雨事例は網羅)、常呂川では全体の74%以上(上位23%の大雨事例は網羅)はこの手法により年最大降雨イベントを検出でき、計画規模に相当するような大雨の取り逃がしがたことを確認している⁶⁾。これは計画規模相当の大雨は総観規模の気象場で決定されることを意味しており、本手法で用いた20 km解像度からの年最大降雨イベントの選定は限られた時間、計算資源量の中での洪水外力の評価において有効であることを示す結果である。

(3) 降雨の確率評価

DSにより得られた過去実験の降雨量と実績の降雨量とを比較し、バイアス補正を実施する。DS実施後の降雨量は実績値と概ね良好な対応関係にあり、バイアス補正係数は十勝川流域で0.99、常呂川流域で1.10であった。

次に、バイアス補正後の降雨量を用い、アンサンブルメンバそれぞれに対して確率雨量を算出する。大量のアンサンブルメンバを用いることで複数(過去実験50メンバ、4℃上昇実験90メンバ)の確率雨量を算出可能となる。確率雨量の度数分布をより鮮明にするために10万通りのリサンプリングを実施し、確率雨量の信頼区間を評価する。

バイアス補正およびリサンプリング手法の詳細に関しては別報⁶⁾を参照されたい。

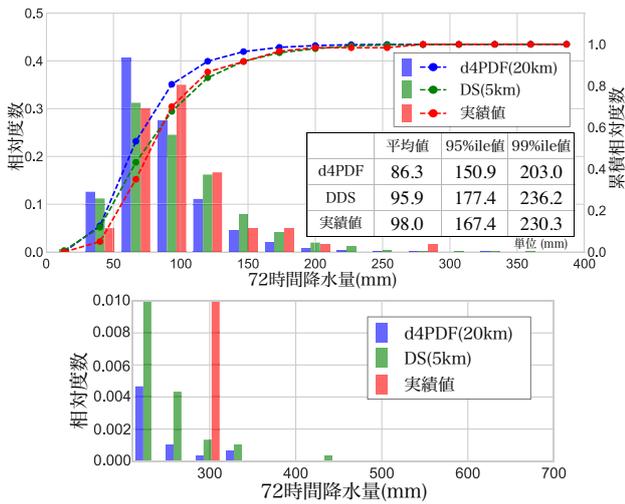


図-2 DS 前後と実績の十勝川流域での年最大流域平均 3 日降雨量の頻度，下は 99%ile 値以上の降雨量に着目したもの。

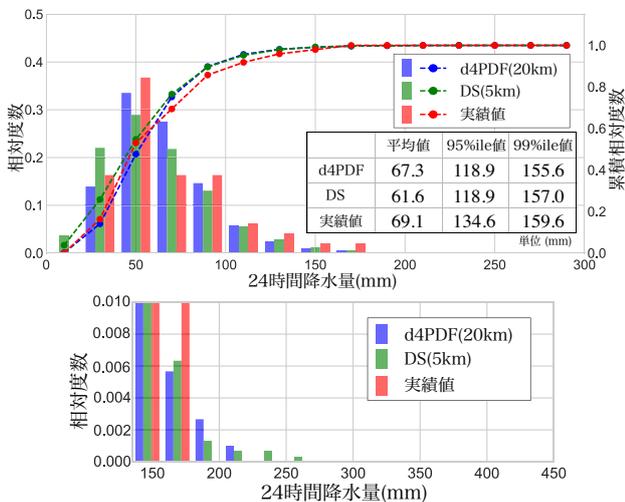


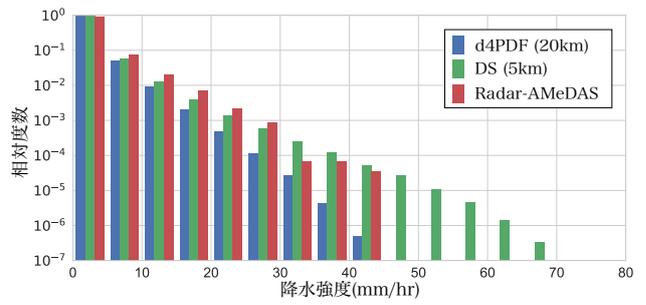
図-3 DS 前後と実績の常呂川流域での年最大流域平均 1 日降雨量の頻度，下は 99%ile 値以上の降雨量に着目したもの。

3. 十勝川流域，常呂川流域への適用

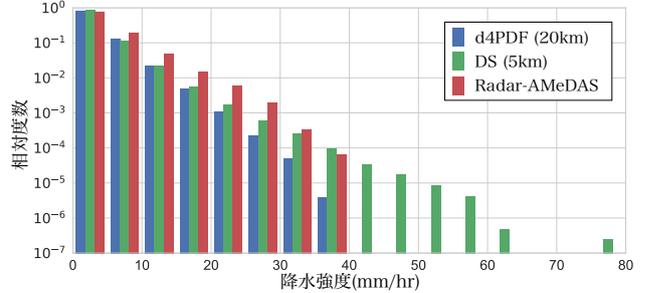
前章の手法を十勝川流域と常呂川流域に適用した際の結果および考察を示す。

(1) DS 前後と実績の降雨特性の比較

d4PDF 過去実験（3000 年分）の DS 前後と実績の年最大流域平均降雨量を比較し，DS による影響を評価した。図-2,3 にそれぞれ十勝川流域での年最大流域平均 3 日降雨量，常呂川流域での年最大流域平均 1 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。図-2 より十勝川流域では DS の影響が大きく，降雨量の大きい事例の頻度が DS 後では多くなり，より実績の頻度に近づいている。DS 後に降雨量が増大する箇所は日高山脈周辺であることから，この降雨量の変化は

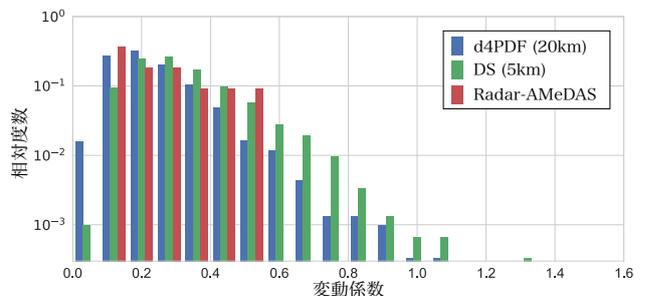


(a) 十勝川流域

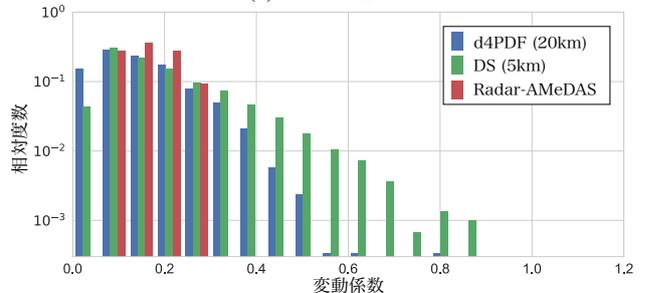


(b) 常呂川流域

図-4 DS 前後と実績の 1 時間降水強度の頻度



(a) 十勝川流域



(b) 常呂川流域

図-5 DS 前後と実績の降雨の空間的な集中度

DS による地形の高解像度化の影響によるものであると考えられる。図-3 より常呂川流域においては 95%ile 以上の降雨量は DS 前後で大きな差が生じなかった。洪水リスクの推定においては計画規模相当やそれ以上の降雨量が重要となり，次に述べる 1 時間降雨強度の頻度を踏まえると，洪水リスクの推定における DS の実施は有効であると判断できる。

図-4 に十勝川流域での流域平均 3 日降雨量および常呂川流域での流域平均 1 日降雨量が最大となる期間における流域内の各格子点の 1 時間降雨強度の頻度分布を示す。同図には DS 前後の結果と 2006 年から 2016 年までのレーダーアメダス解析雨量から同一の条件で

集計した結果を示す。各データは空間解像度が異なるため、緯度経度 0.05° 間隔の格子情報へと線形補間し、流域内の格子点情報を集計した。同図より、d4PDF 領域実験では 1 時間強雨の頻度が実績値と比較して少ないのに対し、DS 後の結果ではレーダーアメダス解析雨量と同程度の頻度で出現していることがわかり、DS により実際の年最大降雨イベントに近い降雨の特徴が得られることが確認された。この傾向は既往の知見⁸⁾とも一致していることから、一般性の高い結果だと判断できる。

同様の降雨の時空間分布情報を用い、降雨の空間的な集中度を算出した。本研究では計画降雨継続時間における流域平均降雨量が最大となる期間における流域内の各格子点上での累積降雨量の変動係数を降雨の空間的な集中度とした。この指標は値が大きいほど局所的な降雨が生じていたことを意味するものである。図-5 に十勝川流域および常呂川流域を対象に DS 前後の結果と 2006 年から 2016 年までのレーダーアメダス解析雨量から算出した変動係数の頻度分布を示す。同図より、DS 後には降雨の空間的な集中化がみられる。これは、DS 後の降雨分布にはより詳細に地形の形状が反映されていることが理由だと考えられる。十勝川流域においては DS 後に局所的な大雨の発生頻度がレーダーアメダス解析雨量の結果に近づき、DS の妥当性が確認できる。

(2) 過去と温暖時の気候条件下での降雨特性の違い

図-6,7 に DS 実施後、バイアス補正前の過去実験と 4°C 上昇実験の年最大降雨量の頻度分布を示す。どちらの流域においても温暖条件下での年最大降雨量は大きいことがわかる。特に計画規模に相当する 99%ile 値の降雨量の変化率は大きく、十勝川流域で 1.34 倍、常呂川流域で 1.38 倍となり、温暖時における洪水リスクの上昇が確認できる。また、これらの倍率は DS の前後によらず同程度となり、DS 実施前のデータを用いても洪水外力の変化をある程度推定可能であることを示唆する結果である。

流域平均の累積降雨量だけでなく、洪水リスクに影響を及ぼすと考えられる降雨の時空間的な集中度に関しても調べた。図-8 に図-4 と同一条件で作成した 1 時間降雨強度の頻度分布を示す。この図より、温暖時には短時間強雨の頻度が増加することがわかる。また、温暖時の年最大降雨は空間的にも集中化する傾向にあり、この降雨の時空間的な集中化傾向は両流域ともに同様であった。降雨の時空間分布の集中化は洪水ピーク流量の増大や氾濫被害形態の変化を招くことが予想されることから、降雨量の増大と合わせて考慮すべきであると考えられる。降雨の時空間分布に関する分析は別報⁶⁾を参照されたい。

(3) 確率雨量

図-9 は十勝川流域における力学的ダウンスケールと

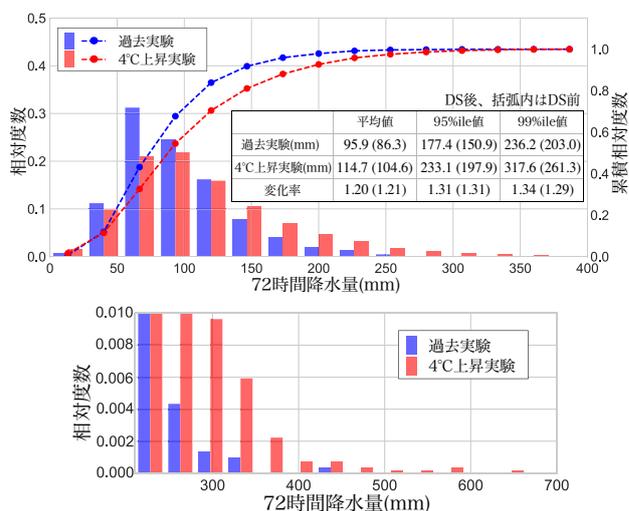


図-6 DS 後の過去実験と 4°C 上昇実験の十勝川流域での年最大流域平均 3 日降雨量の頻度、下は 99%ile 値以上の降雨量に着目したものの。

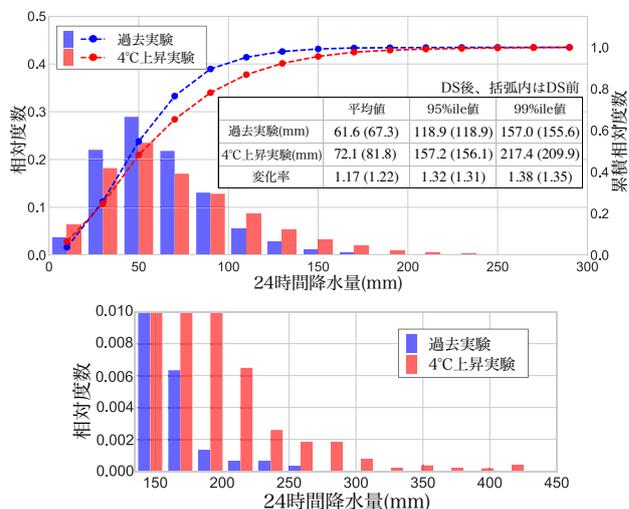


図-7 DS 後の過去実験と 4°C 上昇実験の常呂川流域での年最大流域平均 1 日降雨量の頻度、下は 99%ile 値以上の降雨量に着目したものの。

バイアス補正後の過去（青色の範囲）および将来気候（赤色の範囲）下の確率雨量を示す。なお、黒点は観測実績を表す。この図から両気候ともに確率雨量は幅を有していることがわかる。これは黒点で示される観測実績は過去 60 年間で生じうる確率雨量の一例であることを意味し、過去 60 年間で 50 回存在していた場合を気候モデルによって検討することで明らかとなった。なお、観測実績である黒点の最大値は 283 mm であり、実績値に基づくと約 1/1000 確率の雨量に相当する。これに対し、本検討は気候場の自由度を考慮したことにより、降雨が最大となる観測実績は 1/100 確率の雨量に対するある信頼区間で発生するものと確率統計的に表される。さらには、図中の紫色で示される範囲から、4°C 上昇時の将来気候における年最大雨量は過去気候においても発生する可能性を有しており、将来想定される豪雨への対策は、相対的に洪水・被害リスクは小さいものの現在想定される豪雨への対策であるということを経験的・科学的に考慮した本検討において定量化

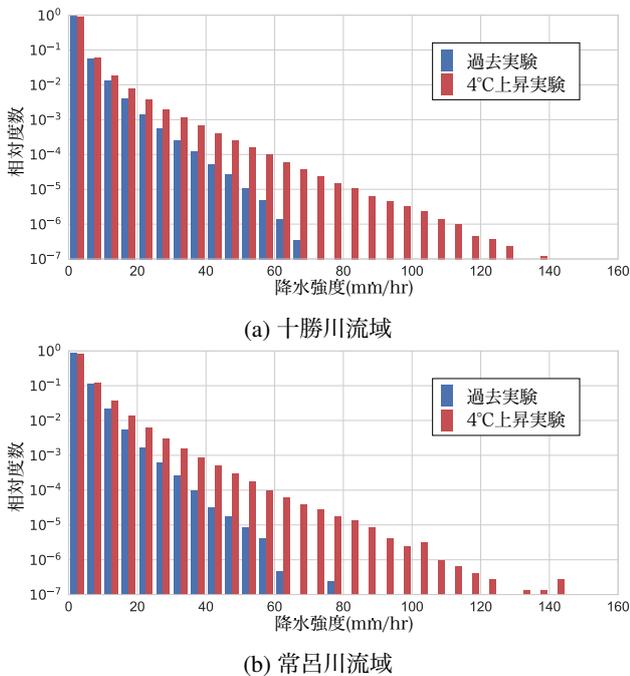


図-8 DS後の過去実験と4°C上昇実験の1時間降水強度の頻度

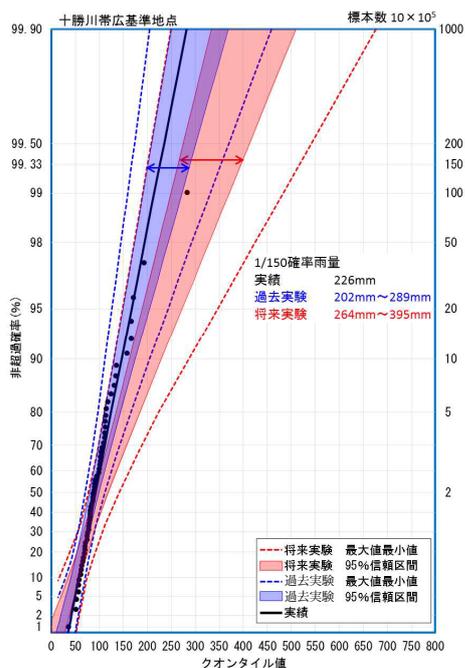


図-9 リサンプリング実行後の降雨データを用いたGumbel分布を適用した確率雨量(十勝川流域における流域平均72時間降水量(mm))。北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会⁶⁾第3回資料より抜粋。

可能となった。

図-9に示す確率雨量の幅が有する意味について考察する。降雨量の認識は前述の時間スケールの長さに加え、観測場所という空間スケールにも依存するものである。図-10は2016年台風10号が北海道に豪雨をもたらした同年8月29日から31日までの積算降雨量を雨量観測の位置が異なっていたらという仮定の下で検討したものである⁹⁾。同流域は周辺を含めると合計10個の雨量計が存在し、これらを使ってティーセン法や算術

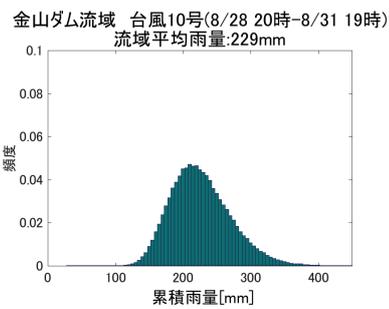


図-10 台風10号時における金山ダム流域を対象にした観測位置の組み合わせによる累積雨量の頻度分布図。対象期間、流域内の全グリッドを用いた累積雨量は8月28日20時から72時間で229[mm]である。小林ら⁹⁾より抜粋。

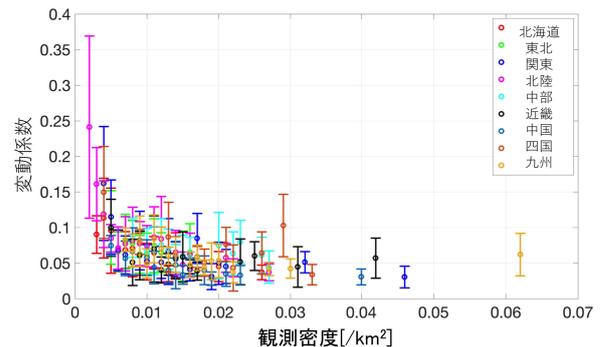


図-11 地域ごとの235流域・上位10降雨イベントについて流域内の観測位置が変化した際に考える72時間累積雨量のばらつきと流域内に現存する地上雨量観測点の密度の関係。各地域に含まれる流域を観測密度0.001[km^2]ごとにグルーピングしその平均値と標準偏差を示した。小林ら⁹⁾より抜粋。

平均法によって流域総降雨量が求められる。ここでは2016年8月を含む11年間のレーダーアメダス解析雨量を用い、同流域内の雨量計の数に相当するグリッド数からランダムに10万通り抽出し、それぞれの総雨量を表したものである。この図から同豪雨イベントでは雨量の計測位置によって総雨量の認識は約100から400mmの範囲を有することがわかる。なお、この豪雨事例において、実際の雨量計の存在するグリッドのみから得られる総降雨量は10万通りの平均値とほぼ同程度であった。図-10で示された降雨観測位置に依存する総雨量の認識の揺らぎの大きさを10万通りの総降雨量の平均に対する標準偏差の比である変動係数で評価し、全国235流域で同様の検討を行った結果を図-11に示す。この結果より、流域総降雨量の認識の揺らぎは10%程度である。

では上記のリスクとはどのように定量化されるのであろうか。図-12に森口¹¹⁾による確率限界法検定を水文頻度解析に導入した清水ら¹⁰⁾の結果を示す。従来の水文統計学では、ジャックナイフ法やブートストラップ法等の数値的手法や、確率水文学がある確率分布に従うという仮定に基づくパラメトリックな手法を用いることによって確率分布モデルの信頼区間は表されてきた。これに対して、確率限界法検定に基づく同論文が

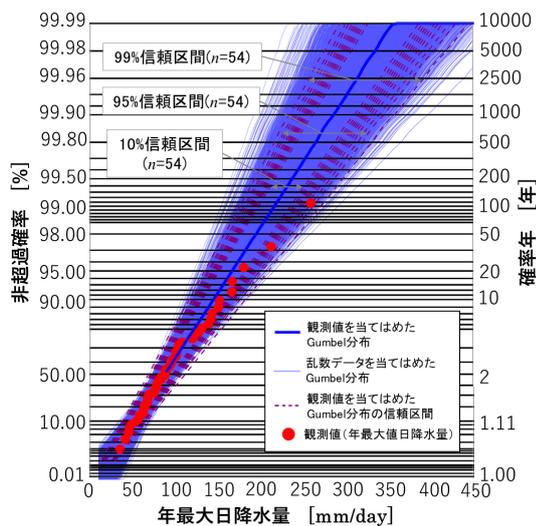


図-12 八丈島観測所における54年間分の年最大日降水量 [mm/day] 及びこれら54個の観測値を当てはめた Gumbel 分布 (太実線), 10,20,30,40,50,60,70,80,90,95,99%信頼区間 (破線), 乱数データを当てはめた5000組の Gumbel 分布 (細実線) を記入した確率紙 ※ n は観測値の総数である。清水ら¹⁰⁾より抜粋。

提案する手法は出来るだけ解析的に確率分布モデルの信頼区間を記述できるという優位性を有する。図-12中に記載の信頼区間は上記の確率限界法検定による値を示す。また図中の青色の細実線は乱数データを適用した5000組の Gumbel 分布を表す。同論文によって確率限界法検定によって得られる信頼区間の精度が確率年にはほぼ依存しないことが明らかにされた。この極値統計手法、統計的モンテカルロ手法により得られた信頼区間に対し、図-9は物理的モンテカルロ手法により求めた信頼区間であり、手法によらず調和的な傾向を示すことが明らかとなった。また、この分布を有する確率年という情報から、T年確率規模の計画において $\alpha\%$ 信頼区間を考えた場合、この値を上回る降雨量が発生する可能性は $(100-\alpha)/2\%$ 存在することを意味する。さらにはT年確率と信頼区間の積からリスクを定量化することが可能となる。従って、図-9に示す過去気候と将来気候下でのT年確率規模の降雨量は、両者を同じT年確率と固定して見ると、それは信頼区間をどこまでで議論するかによってリスクを表すことが可能となる。

4. まとめ

大量アンサンブル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。また、流域平均雨量だけで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。

同手法を十勝川流域、常呂川流域に適用し、以下の結論を得た。

- ・DSの実施により、年最大降雨および1時間強雨の頻

度が実績値に近づく。

- ・過去および温暖時の気候において年最大降雨量は増大、降雨の時空間分布は集中化する傾向にある。

- ・信頼区間を考慮した確率雨量の算出により、同一の生起確率において4℃上昇時の将来気候における年最大降雨量は過去気候においても発生する可能性を有していることを確認した。

謝辞: 本研究の遂行にあたっては一般財団法人北海道河川財団および MEXT/SICAT にご支援をいただいた。また、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。DSの実行においては海洋開発研究機構のご支援 (平成29年度地球シミュレータ特別推進課題 (成果創出加速)) により、地球シミュレータを使用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) T. J. Yamada, J. Sasaki, N. Matsuoka: Climatology of line-shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010, *Atmos. Sci. Let.*, 13, 133-138, 2012.
- 2) 北野慈和, 山本太郎, 小林彩佳, 山田朋人: 2016年8月を含む1961年以降に北海道周辺を通過・上陸した台風の統計的解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_1231-I.1236, 2017.
- 3) 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.
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部: 気候変動適応策に関する研究 (中間報告), 国土技術政策総合研究所資料, No.749, 2013.
- 5) 平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会: 平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方, 2017.
- 6) 北海道地方における気候変動予測 (水分野) 技術検討委員会 (https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html)
- 7) Mizuta, R., and Coauthors: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp.1383-1393, 2016.
- 8) H. Sasaki, A. Murada, M. Hanafusa, M. Oh'izumi and K. Kurihara: Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model. *SOLA*, 7, 173-176, 2011.
- 9) 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), No.73, No.5, I.63-I.69, 2017.
- 10) 清水啓太, 山田朋人, 山田正: 確率限界法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, 土木学会論文集 B1(水工学), No.74, No.4, I.331-I.336, 2018.
- 11) 森口繁一: 確率表現関数の検定について—Kolmogorov-Smirnov 検定を考え直す—, 日本統計学会誌, 第25巻, pp.233-244, 1995.

(2018.4.3 受付)