

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289163

研究課題名(和文) 地球温暖化時の洪水・氾濫の発生頻度・強度の非定常頻度解析と最大規模洪水の評価

研究課題名(英文) Non-stationary analysis of magnitude and frequency on flood hazards and estimation of largest-class floods under a changing climate

研究代表者

立川 康人 (Tachikawa, Yasuto)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40227088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：わが国の河川流域を対象とし、気候変動による洪水流出現象の変化を非定常過程と捉えて極値降水量および極値流量の変化を確率的に分析した。また、擬似温暖化台風実験の降水情報を用いて気候変動時に想定される最大規模の洪水流量を推定した。次に「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、わが国の主要河川を対象とし、極値降水量・極値流量の変化と最大クラスの降水量・河川流量を分析した。また、年最大被害額と超過確率の関係である水害リスクカーブの気候変動による変化を示した。これらの分析を通して、気候変動により洪水強度、洪水リスクが増大することを定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Changes of extreme rainfall and flood events under a changing climate were examined using a non-stationary hydrologic frequency analysis method. Also, largest-class floods were estimated using outputs of a pseudo global warming typhoon simulation experiment. Then, changes of probabilistic characteristics of rainfall and flood extremes and their largest-class values were analyzed using the large ensemble climate simulation database, d4PDF. Adding the hazard change analysis, a method to derive a flood risk curve, a relationship between annual maximum economic damage due to inundation and its exceedance probability, was developed and applied to show the change of flood risk due to climate change. Through these studies, we showed an increase of flood hazard and flood risk under a changing climate.

研究分野：水文学

キーワード：水災害 気候変動 洪水 治水計画 擬似温暖化 水害リスクカーブ d4PDF 降雨流出モデル

1. 研究開始当初の背景

全球大気大循環モデルの進展により、全球モデルが出力する気象・水文情報の空間分解能が著しく向上してきた。本研究グループは、気象庁気象研究所が作成した 20km 空間分解能の温暖化気候推計情報を用いて日本列島全域を対象とした流出シミュレーションを 1km 空間分解能の分布型河川流追跡モデルを用いて実施し、明瞭な流量変化が見られる流域が存在すること、流量変化は日本列島全域で一様に現れるのではなく大きな地域性があること、近未来気候実験で上記の変化が見られ 21 世紀末気候実験では一層その変化が明瞭となる傾向にあることを見出した。

こうした流量シミュレーションによって将来の流況変化の可能性が分析できるようになったが、これらの変化に対する工学的な対応を具体的に考えるためには、洪水の発生頻度と強度が確率分布としてどのように変化するかを示す必要がある。また、最悪の状況を想定して、どのような強度の洪水が発生する可能性があるかを物理的に把握する必要がある。さらに河川流量の変化だけではなく、洪水氾濫の広がりやそれによる被害額を推定することが要求される。

気象庁気象研究所は、20km 分解能全球大気モデルの出力データを力学的にダウンスケーリングし、日本域を対象とする 5km 分解能の超詳細温暖化情報を 2013 年に公開した。この詳細な地球温暖化情報を用いた非定常水文頻度解析手法を適用すれば、年最大値などの極値の確率的な評価の精度向上が期待される。また、最大クラスの洪水規模を分析するために、過去の顕著台風の擬似温暖化実験による降水データを用いた流量計算を行えば、物理的に起こり得る最大クラスの洪水規模を分析できる可能性がある。このように、これまでにない精度で洪水・氾濫の頻度・強度の確率分布を分析し、最大クラスの洪水・氾濫を分析する準備が整ってきた。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、気候変動による洪水流出現象の変化を非定常過程と捉えて極値降水量および極値流量の変化を確率的に分析することを目的とした。また、経路アンサンブル仮想台風実験および擬似温暖化台風実験の降水情報を用いて気候変動時に想定される最大規模の洪水流量の変化を物理的に推定することを目的とした。

こうした研究を進めている中、2016 年 6 月にこれまでにない多数のアンサンブルメンバーを持つ「地球温暖化に対策に資するアンサンブル気候予測データベース d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change)」が公開された。d4PDF は過去気候再現実験 3000 年(1 メンバ 60 年の気候データの 50 アンサンブルメンバー)と将来気候実験 5400 年(1 メンバ 60 年の気候データの 90 アンサンブルメンバー)の

計算結果を収めたデータベースである。これらのアンサンブル情報を用いれば、ノンパラメトリックな解析手法で極値降水量および極値流量の変化を確率的に分析することができる。また、物理的に計算された気候データから最大クラスとみなせる 1000 年程度の再現期間の降水量や洪水流量を分析することができる。そこで d4PDF を用い我が国の主要河川を対象として、極値降水量・極値流量の変化と最大クラスの降水量・河川流量を分析した。また、年最大被害額とその年超過確率の関係である水害リスクカーブの気候変動による変化を示した。これらの分析を通して、気候変動により洪水強度、洪水リスクが増大することを定量的に明らかにした。

3. 研究の方法

(1) 極値水文量の非定常頻度解析と確率水文量の変化の分析

極値降水量の気候変動による変化を検出するため、非定常水文頻度解析手法を適用して全国の T 年確率降水量の変化を分析した。次に、九州全域の河川流量の連続計算を実施し、60 年間の連続流量時系列データから年最大流量時系列を抽出して T 年確率洪水ピーク流量の継時変化を分析した。また、これらの変化を空間的に図化して極値降水量や極値流量の変化が顕著となる地域を検出した。

(2) 擬似温暖化台風実験データを用いた最大クラス洪水の分析

伊勢湾台風をもとに、京都大学防災研究所で実施された経路アンサンブル仮想台風実験および擬似温暖化台風実験の降水データを整理した。次に、この降水データ入力とし、淀川流域で降雨流出計算を実施して、過去の顕著台風による洪水流量の変化を分析した。

(3) d4PDF を用いた極値水文量の変化と最大クラス洪水の分析

「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、極値降水量のノンパラメトリック頻度解析を実施した。また、d4PDF の降水データを用いて降雨流出計算を実施し、極値河川流量のノンパラメトリック頻度解析を実施した。対象流域は、わが国の三大都市圏を流れる荒川流域、庄内川流域、淀川流域とした。また、淀川流域を対象としてダム貯水池による洪水流量の低減効果を分析した。

(4) 気候変動による水害リスクカーブの変化の分析

1km 空間分解能の分布型流出モデルにネ스팅する洪水氾濫モデルを開発し、降雨流出計算から氾濫計算、浸水被害額推定計算までの一連の計算手法を組み合わせ、年最大被害額と超過確率の関係である水害リスクカーブを推定する手法を構築した。これを用いて気候変動による水害リスクカーブの

変化を示し、気候変動により洪水外力だけでなく洪水リスクも変化することを確率的に示した。

4. 研究成果

(1) 極値水文量の非正常頻度解析と確率水文量の変化の分析

気象庁気象研究所の20km空間分解能全球大気モデルMRI-AGCM3.2Sの降水量および地球温暖化情報第8巻の5km分解能の降水量を用いて日本全国を対象として非正常頻度解析を実施し、現在から21世紀末にかけての降水極値の経年変化を分析した。地球温暖化情報第8巻の降水データについてはバイアス補正の有り無しによる極値降水量の違いも分析した。気候変動による極値水文量の経年変化を分析するため、水文頻度解析モデルの母数を時間の関数とし、4種類の非正常水文頻度解析モデルを適用した。最尤法を用いて母数を推定し、TICあるいはAICにより最適な分布関数を決定した。

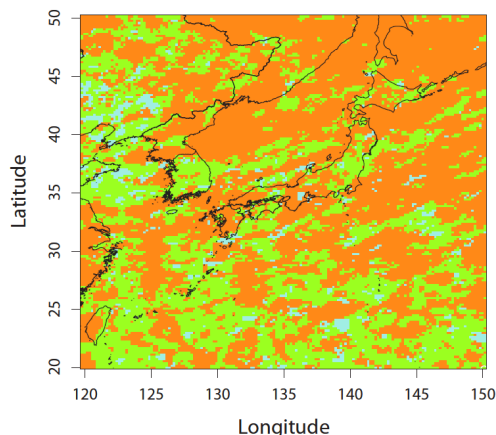


図1: MRI-AGCM3.2S から得た年最大日降水量系列の非正常水文頻度解析による増減結果(現在気候実験と21世紀末気候実験の比較)

MRI-AGCM3.2S から得られた年最大日降水量時系列に対する非正常水文頻度解析の結果を図1に示す。現在気候実験の中間年(1993年時点)に対する21世紀末気候実験の中間年(2089年時点)の100年確率年最大日降水量の増減を表しており、橙色が増加、黄緑が変化なし、水色が減少を表す。中部地方以西と東北地方北部、北海道で100年確率年最大日降水量の増加傾向が見られる。21世紀末気候実験で減少傾向となる地域はほとんど見られない。

地球温暖化情報第8巻を用いて同様の分析を実施した結果を図2に示す。現在気候実験の中間年(1990年)に対する将来気候実験の中間年(2086年)の100年確率年最大24時間降水量の増減を表しており、赤が増加、緑が変化なし、青が減少を表す。全国的に増加傾向にあり、関西以北の大半の地域で増加あるいは変化なし、特に北海道と北日本ではほと

んどの地域で増加傾向にあり、MRI-AGCM3.2Sを用いた分析と同じ結果が得られた。北海道地方や北日本では特に増加傾向が大きい。これらの地域は一般的に降水量が少なく、大雨の経験が少ない。これまでの整備水準を上回る降水量が、設定されている確率年よりも短い間隔で発生する可能性がある。

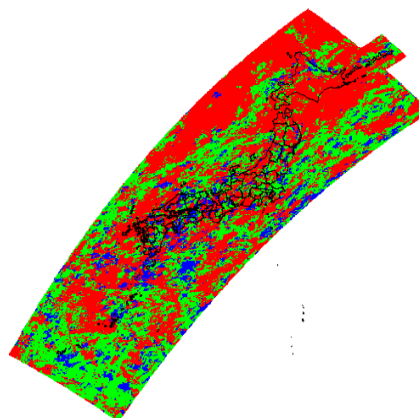


図2: 地球温暖化情報第8巻から得た年最大24時間降水量時系列の非正常水文頻度解析による増減結果(現在気候実験と21世紀末気候実験の比較)

次に、地球温暖化情報第8巻に含まれる時間降水量データと蒸発散量データを入力データとし、1km分解能の分布型降雨流出モデル1K-DHMを用いて60年間の連続流量計算を九州地方全域で実施した。連続流量時系列データから、年最大時間流量系列、年最大日流量系列を1km分解能のグリッドごと抽出し、地点ごとに非正常水文頻度解析を実施して、ほぼ全域で年最大流量の増加を確認した。

(2) 擬似温暖化台風実験データを用いた最大クラス洪水の分析

京都大学防災研究所の竹見らは台風の特徴を維持したまま初期位置を変化させて台風の動きを計算する渦位逆変換法を開発した。図3は伊勢湾台風はこの手法を適用し気象モデル(WRF/ARW3.3.1)によって計算された複数の台風経路である。竹見らはさらにこの手法に擬似温暖化手法を組み合わせ、気候変動下で伊勢湾が来襲した場合の台風シミュレーションを実施した。本研究ではこの台風シミュレーションデータを入力し、降水データを入力データとして、淀川流域の洪水シミュレーションを実施した。

淀川流域の枚方地点の河川流量最大値の計算結果を図4に示す。枚方地点のピーク流量が最大となったコントロール実験の台風経路は、実際の伊勢湾台風とほぼ同じ経路であり、現実が発生した経路は淀川流域の洪水発生にとって最大の洪水をもたらす経路であったことがわかった。また、枚方地点のピーク流量について、擬似温暖化実験はコントロール実験を上回り、気候変動によって最大の洪水はさらに大きくなることを確認した。なお、淀川流域に既往最大の降雨をもたらす

た平成 25 年台風 18 号の最大流量は伊勢湾台風の擬似温暖化実験とほぼ同じ値となり、現実にかつた台風が発生していることがわかった。

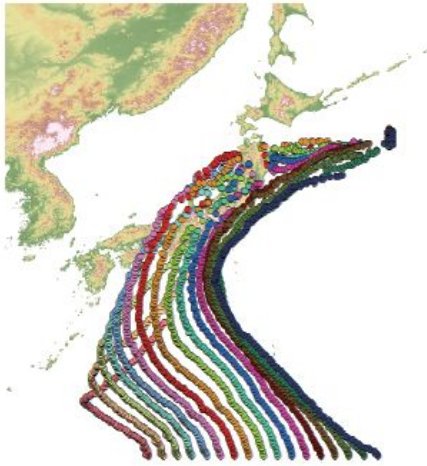


図 3：経路アンサンブル仮想台風実験で得られた伊勢湾台風の台風経路

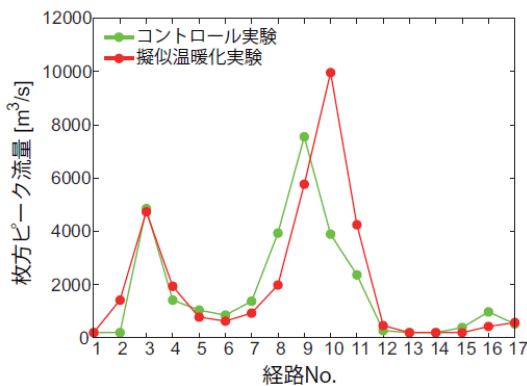


図 4：台風経路ごとの淀川流域(枚方地点)での最大流量の計算結果

次に、同じ伊勢湾台風を対象とし、異なる気象モデル(WRF/ARW3.3.3とJMA-NHM)と異なる海水面温度設定の擬似温暖化台風シミュレーションデータを用いて、淀川流域の洪水流量を算定した。その結果、擬似温暖化時の枚方地点のピーク洪水流量は、どちらの気象モデルを用いた場合も再現計算による洪水流量を上回るケースが多数発生することがわかり、地球温暖化によって洪水流量が増加することをを確認した。

(3)d4PDF を用いた極値水文量の変化と最大クラス洪水の分析

d4PDF を用い、過去実験 3000 年分、4 度上昇実験 5400 年分の 20km 空間分解能の高解像度大気モデル実験データを用い、荒川流域、庄内川流域、淀川流域を対象として、短時間降水強度および河川流量の極値分布の変化を分析した。まず初めに d4PDF 過去実験の極値降水量の再現性を確認した。淀川流域の年最大 24 時間流域平均雨量の確率プロットを

図 5 に示す。非超過確率はワイブル公式を用いて定めた。図 5 の一つの折れ線は、過去実験の一つのアンサンブルメンバ 60 年分の計算での年最大値と非超過確率の関係を示しており、全部で 50 メンバの折れ線と同じ図に示している。観測降雨と全アンサンブルメンバの確率プロットがよく対応し、過去実験の再現性のよさを確認した。次に、両データが同じ頻度分布といえるかを 2 標本コルモゴロフ=スミルノフ検定を用いて検定し、両者の分布が同じであるという仮説は棄却できないという結果を得た。そのためバイアス補正は加えず、そのまま後の分析に用いた。荒川流域、庄内川流域も同様の結果であった。

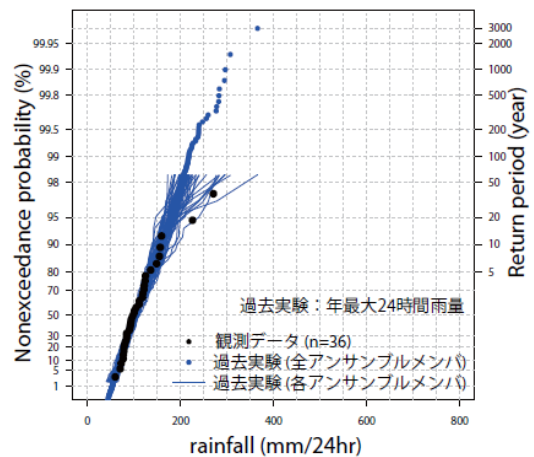


図 5：淀川流域平均雨量(枚方地点上流域)の年最大 24 時間雨量の確率プロットの観測値と過去実験との比較

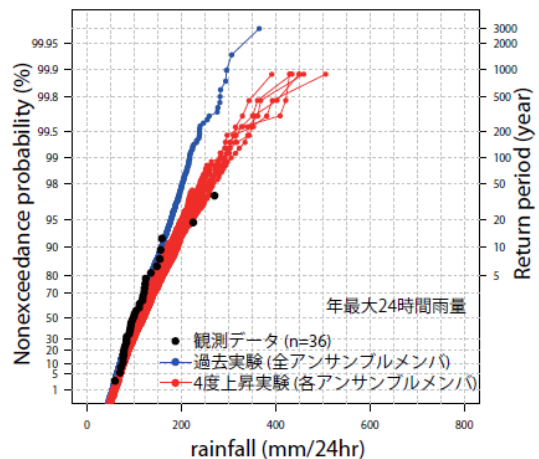


図 6：淀川流域平均雨量(枚方地点上流域)の年最大 24 時間雨量の確率プロットの観測値と過去実験、4 度上昇実験との比較

次に、将来気候実験(4 度上昇実験)と過去実験の極値降水量を比較した。年最大 24 時間降水量の確率プロットの違いを図 6 に示す。4 度上昇実験は 6 個の異なる海水面温度分布ごとに 900 年分の計算が実施されている。海水面温度分布ごとに得られる年最大 24 時間雨量の標本分布を 2 標本コルモゴロフ=ス

ミルノフ検定を用いて検定したところ、同じ分布とはいえないパターンが多数あった。そこで、4 度上昇実験では全メンバを統合せずに海水面温度分布ごとの確率プロットを図 6 に示す。どの海水面温度分布でも、気候変動により年最大 24 時間雨量は増加することがわかる。降雨継続時間を 48,7296 時間とした場合も同じ結果が得られた。注目すべき結果として、過去実験の再現期間 900 年の確率降水量と 4 度上昇実験の再現期間 200 年のそれとがほぼ同じ値となる結果を得た。荒川流域、庄内川流域でも同様の結果を得た。

次に、d4PDF の降水データを入力データとし分布型降雨流出モデル 1K-DHM を用いて河川流量を計算した。年最大 24 時間雨量を含む降水事象のときに年最大時間流量が発生する可能性が高いが、降水の時空間分布や前期雨量によってそうでない場合も起こり得る。そこで、年ごとに 1 位～3 位の 24 時間雨量を抽出し、24 時間雨量開始時刻の 3 日前から 4 日後までの 10 日間を降水データを作成した、次にこの間の流出計算を分布型流出モデルを用いて実施し、対象地点のピーク時間流量を得て、3 つの中の最大値を年最大時間流量とした。

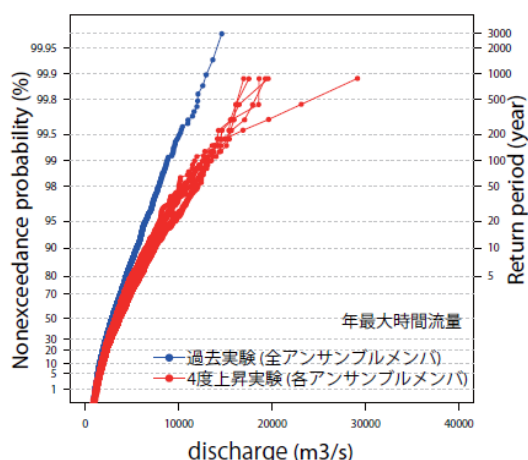


図 7：淀川流域枚方地点での年最大洪水ピーク流量の確率プロットの過去実験と 4 度上昇実験との比較

淀川流域の枚方地点での年最大洪水流量の確率プロットを図 7 に示す。気候変動により洪水ピーク流量が増大することがわかる。過去実験の再現期間 900 年の値よりも 4 度上昇実験の 200 年確率値の方が大きくなり、過去実験の 200 年確率値の 1.5 倍から 1.7 倍となった。極値降水量では過去実験の再現期間 900 年の値と 4 度上昇実験の 200 年確率値がほぼ同程度の値で増加率は 24 時間雨量で 1.3～1.4 倍であり、年最大流量の方が増加率は大きい。一般に降雨強度が大きくなれば、ある値を境として洪水ピーク流量はより大きな増加率を示す。この降雨流出現象の非線形性が表れて、洪水ピーク流量の増加率は降雨の増加率を上回ったものと考えられる。

ここで計算した流量は、対象地点まで堤防を越流することなく流れることを仮定した河川流量である。計画規模の再現期間を超える流量は、実際には上流で越流あるいは破堤が発生してこれよりも小さな値となる可能性が高いが、計画規模との違いを把握するために有用である。主要な結果として以下を得た。1) 4 度上昇実験では特に低頻度の雨量強度と流量強度が増加する。2) 過去実験で最大クラスに相当する再現期間 900 年の確率降水量と 4 度上昇実験の再現期間 200 年のそれとがほぼ同じ値となる結果を得た。3) 再現期間 200 年に相当する確率降水量で比較すると、雨量は 1.3～1.4 倍、流量は 1.5～1.7 倍程度となった。

次に、淀川流域を対象として気候変動時のダム貯水池による洪水低減効果を分析した。過去実験、4 度上昇実験ともにダムが存在する場合は枚方地点のピーク流量が減少し、再現期間によらず、ダム貯水池の効果が発揮されることがわかった。過去実験ではダム流入量が再現期間 10 年程度の洪水からダムの治水効果が表れはじめ、再現期間 500 年から 1,000 年で最大の効果が現われた。4 度上昇実験では再現期間 5 年程度から治水効果が現れ始め、再現期間 200 年～500 年で 3,000～5,000m³/s のピークカット効果が見られた。

(4) 気候変動による水害リスクカーブの変化の分析

1km 空間分解能の分布型洪水流出モデル 1K-DHM を母体としてそれにネスティングする空間分解能 50m の洪水氾濫モデルを開発し、浸水被害額の算定法と結び付けて、年最大浸水被害額と超過確率の関係である水害リスクカーブを導出する手法を開発した。

淀川流域の京都市街域の水害リスクとその将来変化を評価した。将来変化推定には d4PDF を用い、現在および将来の水害リスクを比較した。d4PDF と観測降雨を用いて作成したそれぞれの水害リスクカーブを図 8 に示す。各アンサンブルメンバは、計算の初期値、および過去の海水と海面水温の観測値が異なっており、観測降雨はその中の実現値の 1 つと考えることができる。したがって、黒線の観測降雨による水害リスクカーブが細青線群で示す過去実験のアンサンブルメンバの範囲に入っていることから、観測降雨と過去実験の降雨データによる水害リスクカーブは整合していると考えられる。

太赤線は、4 度上昇実験の 5400 年間分の降雨データによる水害リスクカーブを示しており、水害による被害の発生頻度（浸水被害額ゼロに対応する年超過確率）および大きな浸水被害額の年超過確率の両方が、過去実験よりも大きく増加している。このことから、4 度上昇条件下の気候条件では水害リスクが大きく増加するといえる。また、細い赤線は各アンサンブルメンバの結果を表しており、多くは太赤線の周りに集中しているが、中に

はかなり大きなリスクを示すメンバも存在する。海面水温の空間分布パターンによっては過去実験より著しく大きなリスクを示す場合もあることが分かった。その結果、両者の水害リスクカーブに明瞭な違いが現れ、4度上昇実験での水害リスクが大きくなることが確率的に明らかになった。

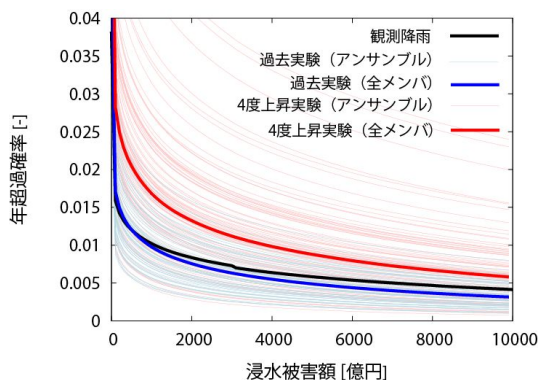


図 8 : d4PDF による降雨データと観測降雨データによる水害リスクカーブ (黒線: 観測降雨, 青線: 過去実験, 赤線: 4 度上昇実験。細い線と太い線はそれぞれ, 各アンサンプルメンバと全メンバを用いた場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

林敬大, 立川康人, 椎葉充晴: 時変母数による非常常水文頻度解析手法のモデル選択に関する考察, 土木学会論文集, B1(水工学), 71(1), 28-42, 2015, 査読有

<http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.28>

立川康人, 森信治, キムスンミン, 萬和明: 非常常水文頻度解析手法を用いた極値降水量の変化予測 -地球温暖化予測情報への適用-, 土木学会論文集, B1(水工学), 71(4), I_367-I_372, 2015, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_367

田中智大, 立川康人, 萬和明: 降雨の時空間分布を考慮した浸水・氾濫に対する水害リスクカーブの作成, 土木学会論文集, B1(水工学), 71(4), I_1483-I_1488, 2015, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_1483

森信人, 中北英一, 竹見哲也, 立川康人: 気候変動にともなう風水害の将来変化予測の現状について, 環境情報科学, 44(1), pp.12-17, 2015, 査読無

田中智大, 立川康人, 椎葉充晴, 萬和明: 降雨継続時間に応じた総降雨量の条件付き分布関数による総合確率法の改良, 土木学会論文集 B1(水工学), 71(2), 63-71, 2015, 査読有

<http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.63>

Yasuto TACHIKAWA: Impact assessment of climate change on water-related disasters for building up an adaptation strategy, THA2015, International Conference on Climate Change and Water & Environment

Management in Monsoon Asia, 28-30 January 2015, Bangkok, Thailand, Invited paper D03, 査読無

田中智大, 立川康人, 市川温, 萬和明: 降雨継続時間に対する総降雨量の条件付き確率分布を用いた水害リスクカーブの作成, 土木学会論文集 B1(水工学), 72(4), I_1219-I_1224, 2016, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejhe.72.I_1219

宮脇航平, 立川康人, 田中智大, 石井大貴, 市川温, 萬和明, 竹見哲也: 最大クラス台風を想定した淀川流域における洪水流出シミュレーション, 土木学会論文集, B1(水工学), 72(4), I_31-I_36, 2016, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejhe.72.I_31

田中智大, 立川康人, 市川温, 萬和明: 浸水被害額を支配する水量の分析と水害リスクカーブの作成への応用, 土木学会論文集 B1(水工学) 72(1), pp. 26-37, 2016, 査読有

<http://doi.org/10.2208/jscejhe.72.26>

Yasuto TACHIKAWA: Prediction of extreme floods and risk curve development under a changing climate, THA2017, International Conference on Water Management and Climate Change Towards Asia's Water 25 - 27 January 2017, Bangkok, Thailand, Invited paper D02, 査読無.

〔学会発表〕(計 20 件)

〔その他〕

ホームページ (河川流量計算に用いた計算機プログラムと解説書)

<http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立川 康人 (TACHIKAWA, Yasuto)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40227088

(2) 研究分担者

キム スンミン (KIM, SUNMIN)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10546013

市川 温 (ICHIKAWA, Yutaka)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30293963

萬 和明 (YOROZU, Kazuaki)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 90554212

椎葉 充晴 (SHIIBA MICHIHARU)
京都大学・大学院工学研究科・名誉教授
研究者番号: 90026352