

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	
	市川 温 (いちかわ ゆたか)	京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	准教授	
②研究テーマ	名称	総合確率法を基礎とした水災害リスクカーブ作成手法の開発		
	政策領域	[分野] 流域計画・流域管理課題分野	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]		
③研究経費 (単位: 万円)	平成27年度	平成28年度	平成 年度	総 合 計
※端数切り捨て。	220	220		440
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・役職 (※平成29年3月31日現在)		
萬 和明		京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻・助教		
田中智大		京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻・助教		
⑤研究の目的・目標 (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>水災害リスクの適切なマネジメントに資するため、本研究では、総合確率法を基礎とした水災害リスクカーブ作成手法を開発する。水災害リスクカーブとは浸水による経済的被害額とその年超過確率の関係を表す曲線のことであり、本手法により、現実に即した水災害リスクの評価が可能となる。</p> <p>まず、豪雨による水災害被害額を算定するための降雨流出・氾濫一体型モデルを開発する。つぎに、総合確率法に基づいて、降雨の時空間分布を考慮して降雨の確率分布から水災害被害額の確率分布を推定する手法を開発する。この手法を実際の流域に適用し、対象地域の水災害リスクの評価（現在／将来）、浸水被害確率マップの作成などを行う。</p>				

⑥研究成果

(様式 H-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

1. 降雨流出・氾濫一体型モデルの構築

本研究では、kinematic wave モデルをベースとした分布型の降雨流出モデルと、平面二次元の洪水氾濫モデルを組み合わせて、降雨流出過程と洪水氾濫過程を一体的に表現するモデルを構築する。

本研究で用いる降雨流出モデルは対象領域を約 1 km 四方のセルに分割し、各セルからの雨水流出とセル間の水移動を計算する。雨水流出過程は、表面流と中間流を考慮した kinematic wave モデルで表現する。セル間の水移動は河道を通じて行われるとし、一般的な kinematic wave モデルで計算する。

また、洪水氾濫過程は、浅水方程式から移流項を除いた平面二次元の局所慣性方程式を用いてモデル化する。洪水氾濫モデルは降雨流出モデルにネスティングされている。すなわち、降雨流出の計算セルをさらに細かく分割し、降雨流出モデルによって計算された河川流量を境界条件として洪水氾濫計算を行う。

2. 改良総合確率法に基づく水災害リスクカーブ作成手法の開発

改良総合確率法の考え方に基づいて、一雨雨量の確率分布から年最大浸水被害額の確率分布関数を導出する手法を開発する。ここでは、総降雨量と降雨継続時間の関連に着目して、一雨による浸水被害額の確率分布を以下の3つの仮定のもとで求める。

【仮定1】流域平均総降雨量 r_a は降雨継続時間 d の条件付き確率分布関数 $G_{R_a|D}(r_a | d)$ に従うとする。

【仮定2】降雨事象は N 個のパターンのみをとるとし、 i 番目の降雨パターンが生起する確率を p_i とする。また、このときの降雨継続時間を d_i とおく。

【仮定3】すべての降雨パターンで、総降雨量のみを増加させた場合、浸水被害額は単調に増加する。

仮定1, 2が成り立つとすると、降雨事象が発生したときに浸水被害額 m が特定の浸水被害額 m_1 を超える確率は、ある降雨パターンが生起する確率と、その降雨パターンによって生起する浸水被害額 m が m_1 を超える確率との積和をすべての降雨パターンについてとることで、次式として得られる。

$$\Pr[m \leq m_1] = \sum_{i=1}^N p_i \Pr[r_a \leq r_{a,i}(m_1) | d = d_i] \quad (1)$$

ここで $r_{a,i}(m_1)$ は、降雨パターンを i に固定して、総降雨量 r_a だけを変化させたときに、水災害被害額が m_1 になるような総降雨量を表している。仮定3によってそのような総降雨量を求めることができる。ある降雨パターンに対して降雨流出・氾濫計算を行い、その結果から水災害被害額を算出する。降雨パターンは固定したまま総降雨量だけを変えながらこの手続きを繰り返せば、その降雨パターンにおける総降雨量と水災害被害額の関係が得られる。

上式の左辺は、浸水被害額の超過確率を表しているので、この確率分布関数を $G_M(m)$ と表すと、一雨による浸水被害額の確率分布は次式で与えられる。

$$1 - G_M(m) = \sum_{i=1}^N p_i [1 - G_{R_a|D}(r_{a,i}(m) | d_i)] \quad (2)$$

次に、降雨事象の発生を以下のように仮定して年最大浸水被害額の確率分布を求める。

【仮定4】降雨の発生は、単位時間あたりの発生確率が μ_a のポアソン過程に従う。

仮定4により、(浸水被害額 $m=0$ を含む) 浸水事象の発生も単位時間あたりの発生確率が μ_a で、事象が発生したときの浸水被害額の確率分布関数が(2)式によって求められる複合ポアソン過程に従うため、年最大浸水被害額 m の確率分布関数 $F_M(m)$ は、

$$F_M(m) = \exp[-\mu_a \Delta t (1 - G_M(m))] \quad (3)$$

⑥研究成果（つづき）

から計算できる．ここで， Δt は時間間隔であり，ここでは1年を表す．(3)式に(2)式を代入すると

$$F_M(m) = \exp\left[-\mu_a \Delta t \sum_{i=1}^N p_i \left(1 - G_{R_a|D}(r_{a,i}(m) | d_i)\right)\right] \quad (4)$$

となる．降雨継続時間に対する総降雨量の条件付き確率分布関数 $G_{R_a|D}(r_a | d)$ が得られる場合は，(4)式を用いて年最大浸水被害額の確率分布を得ることができる．

3. 京都市周辺域における水災害リスクカーブの推定

1, 2で説明した手法を淀川流域（図1）に適用し、京都市周辺域の水災害リスクカーブを推定する。

まず、2013年台風18号の出水を用いて降雨流出モデルの妥当性を検証した。図2に枚方地点での計算河川流量と国土交通省が推定したピーク流量の比較を示す。数百 m^3/s の違いはあるが、おおよそ一致している。

つぎに、このモデルを用いて、総降雨量と水災害被害額の関係性を求めた。具体的には、過去の降雨事象から抽出した 250 の降雨パターンに対して総降雨量の値だけを変えて降雨流出・氾濫計算を繰り返し、総降雨量と水災害被害額の関係（図3）を求めた。図中の一本一本の線が一つの降雨パターンに対応している。

降雨継続時間に対する総降水量の条件付き確率分布関数 $G_{R_a|D}(r_a | d)$ は、降雨継続時間と総降水量の同時確率分布と降雨継続時間の周辺確率分布から推定した。同時確率分布は、接合分布関数を用いて降雨継続時間と総降水量それぞれの周辺確率分布から推定した。

以上の結果を(4)式に代入し、京都市周辺域の水災害リスクカーブ（図4）を作成した。これによれば、当該地域における100年確率の水災害被害額は約1兆円であり、やや過大のようにも思われる。これは、総降水量の周辺確率分布として一般化パレート分布を採用したことがやや不適當であった可能性がある。次の(4)では、引き続き一般化パレート分布を用いた結果を示すが、そのあとの(5), (6)では、総降水量の周辺確率分布に指数分布を適用した結果を示す。

4. 京都市周辺域の将来の水災害リスクの評価

ここでは、本研究で開発した水災害リスクカーブ作成手法に、超多数アンサンブル気候情報d4PDFを適用し、京都市周辺域の将来の水災害リスクを評価する。

d4PDF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であり、「過去実験」と「4度上昇実験」で作成された多数のアンサンブルデータの集合体である。ここでは過去実験・4度上昇実験それぞれの降雨データに基づいて図5のように京都市周辺域における水災害リスクカーブを作成した。

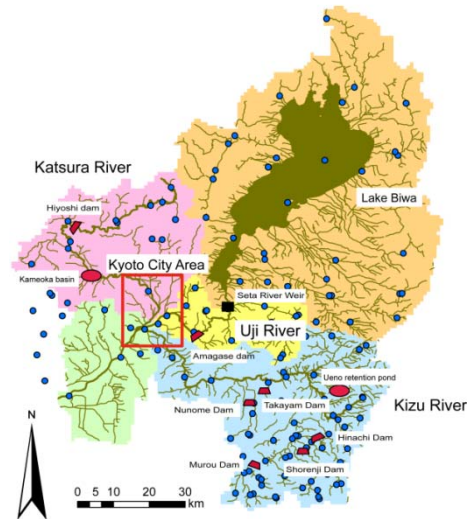


図 1 淀川流域（青丸は降雨観測所，赤線枠内が水災害リスクカーブの算定対象領域）

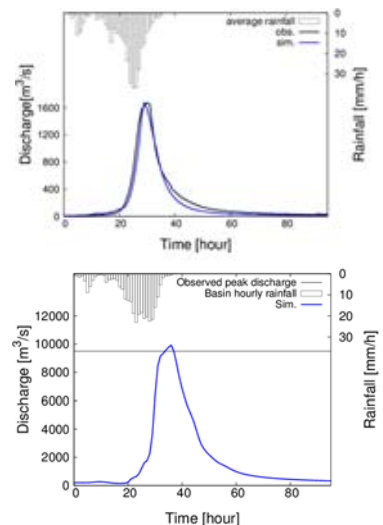


図 2 河川流量の比較（上：日吉ダム流入量，下：枚方地点）

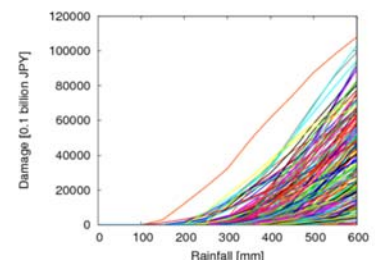


図 3 総降雨量と水災害被害額の関係

⑥研究成果（つづき）

図中の黒線は、観測雨量を用いて得た水災害リスクカーブであり、図4に示したリスクカーブと同じである。青線と赤線はそれぞれ、過去実験と4度上昇実験の降雨データを用いて作成したリスクカーブであり、太い線はすべてのアンサンブルデータをまとめて使用して作成したリスクカーブ、細かい線は個々のアンサンブルデータに基づいて作成したリスクカーブである。

観測雨量に基づく黒線は細い青線（過去実験の各アンサンブルデータ）のばらつきの中に含まれている。このことから、d4PDFの過去実験は、実際の降雨イベントと同様なイベントを模擬することに成功しているといえる。また、黒線は太い青線（過去実験すべてのデータから作成したもの）より同一の浸水被害額に対して大きな年超過確率を与えている。これは、過去に観測された降雨量時系列が、長期間の平均的な雨量に比べてやや大きな値であったことを意味している。

つぎに、青線（過去実験）と赤線（4度上昇実験）を比較する。細線、太線のいずれも全体的に赤線のほうが青線よりも上のほうに位置しており、将来のほうが高い確率で浸水被害が生じること、すなわち地球温暖化が進むと水災害リスクは高くなることを意味している。

5. 京都市周辺域の浸水被害確率マップの推定

京都市周辺域の各地点で浸水被害額の再現期間を示した浸水被害確率マップを作成する。本研究で開発した水災害リスクカーブ作成手法を各地点の資産に適用して水災害リスクカーブを作成し、任意の再現期間に対応する浸水被害確率マップを作成する。

まず、国土交通省の観測値から得た多数の降雨事象のデータを降雨流出・氾濫一体型モデルに入力し、降雨量と各計算セルの被害額の関係を得た。また、上記の雨量データから一雨雨量と継続時間の同時確率密度関数を推定した。その際、一雨雨量の周辺分布が必要となる。(3)では一般化パレート分布を適用したが、ここでは指数分布を適用した。以上より、再現期間300～1,000年の浸水被害確率マップを作成した。ここでは、再現期間600年に対応する浸水被害確率マップを図6に示す。桂川左岸および木津川の兩岸を中心に浸水被害が広がっていることがわかる。

6. 建築規制（床高上げ）の水災害軽減効果の分析

住宅一階床面をかさ上げするという建築規制を想定し、その規制の水災害軽減効果を水災害リスクカーブで分析する。対象地域は京都市周辺域である。高さ h_0 の床高上げした場合の浸水被害額は、見かけ上最大浸水深が h_0 減少したときの被害額に等しいと考える。

図7に再現期間が1000年の浸水被害額の空間分布を示す。左が現状の浸水被害額、右が住宅の一階床面を50 cmかさ上げしたときの浸水被害額である。現状に比べて床高上げ後のほうが被害の範囲が狭い。

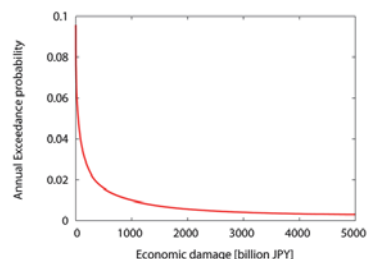


図4 京都市周辺域の水災害リスクカーブ

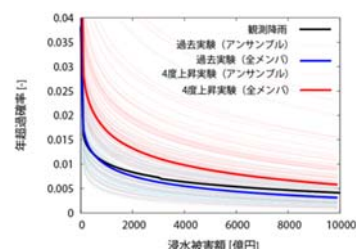


図5 d4PDFに基づく水災害リスクカーブ

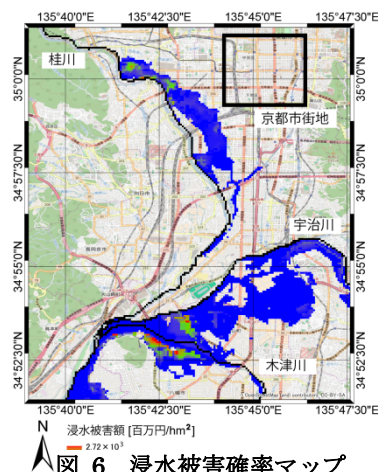


図6 浸水被害確率マップ (再現期間 600年)

⑥研究成果（つづき）

図8に現状と床高上げ時のリスクカーブの比較を示す。黒線が現状、青線が 50 cm 床高上げ時、赤線が 1 m 床高上げ時のものである。50 cm 床高上げを実施すると、リスクは比較的大きく下がる。さらに 50 cm 床高上げすると、もちろんリスクは下がるが、その下げ幅はさほど大きくない。対象地域全域での年期待被害額は、現状で約12億円、50 cm 床高上げ時は約8億円で、年期待被害額は4億円程度低減する。1 m 床高上げ時の年期待被害額は約6億円で、50 cm 床高上げに比べて2億円程度被害額は低減する。同じ床高上げ幅であっても、徐々にその効果は小さくなると予想される。

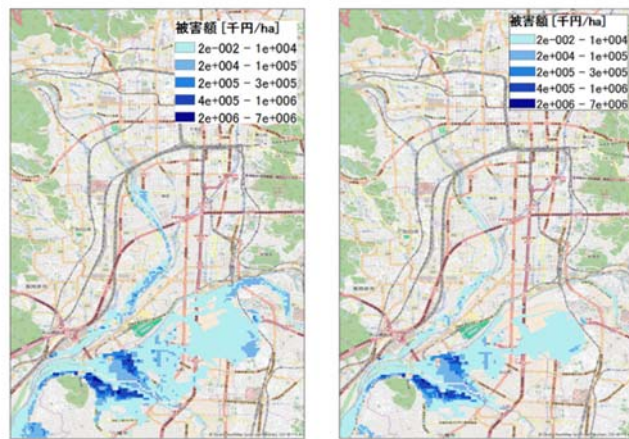


図 7 再現期間 1000 年の浸水被害額の空間分布。(左) 現状 (床高上げなし), (右) 床高上げ時

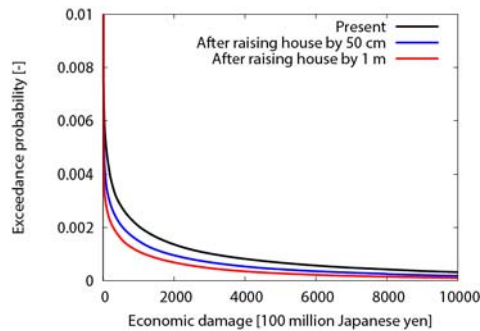


図 8 リスクカーブの比較。(黒) 現状 (床高上げなし), (青) 50 cm 床高上げ時, (赤) 1 m 床高上げ時

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

1. 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)，pp. I_1219-I_1224，2016.
2. 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理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.
3. 田中智大・吉岡秀和・木村匡臣・山崎大：1次元局所慣性方程式に対する摩擦項を考慮した数値安定性解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 73，No. 4，pp. I_577-I_582，2017.

・国際会議、学会等における発表状況

1. 田中智大・立川康人・椎葉充晴・萬和明：総降雨量と降雨継続時間の関連を考慮した総合確率法の改良，平成27年度土木学会年次学術講演会.
2. 田中智大・立川康人・市川温・萬和明：降雨の時空間分布の違いが浸水被害額に与える影響の分析，水文・水資源学会2015年研究発表会.
3. 田中智大・立川康人・市川温・萬和明：京都市周辺域の浸水被害確率マップの作成，水文・水資源学会2016年度研究発表会.

・投稿中の論文

1. Tomohiro Tanaka, Yasuto Tachikawa, Yutaka Ichikawa, Kazuaki Yorozu: Extreme flood frequency analysis incorporating a flood-inundation model for flood risk assessment, Journal of Hydrology, Submitted.

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。)

田中智大・立川康人・市川温・萬和明：降雨の時空間分布の違いが浸水被害額に与える影響の分析，水文・水資源学会2015年研究発表会優秀ポスター賞（金賞）。

田中智大・立川康人・市川温・萬和明：京都市周辺域の浸水被害確率マップの作成，水文・水資源学会2016年度研究発表会優秀ポスター賞（金賞）。

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流域計画・流域管理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。)

・水災害防止軽減策の水災害リスクカーブによる評価

さまざまな水災害防止軽減策を実施することによって、どの程度水災害リスクが軽減されるのか定量的に評価する。具体的には、以下のような内容を特定の地域を対象として実施することが考えられる。

- (1)過去、現況、河川整備完成時のそれぞれの時点に対する水災害リスクカーブを作成し、相互に比較することで、実際の治水事業によってどのように水災害リスクが低減されているのか分析する。
- (2)実際に実施されている治水事業に加えて、建築規制のような流域管理的対策を実施することによってどのように水災害リスクが低減するのか、リスクカーブを用いて分析する。また、便益（水災害リスクの低減）と費用を比較し、どのような対策が有益なのか検討する。

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、流域計画・流域管理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。)

本研究で開発された水災害リスクカーブ算定手法を用いることで、浸水による経済的リスクおよび水工施設の整備や流域管理的対策によるリスクの変化を定量的に評価できるため、様々な水害対策・適応策から費用対効果の高い最適な施策の組み合わせを考える上で基礎的な情報を提供できると期待される。