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

A FLOOD RISK CURVE DEVELOPMENT USING CONDITIONAL PROBABILITY DISTRIBUTION OF RAINFALL ON DURATION

田中 智大¹・立川 康人²・市川 温³・萬 和明⁴

Tomohiro TANAKA, Yasuto TACHIKAWA, Yutaka ICHIKAWA and Kazuaki YOROZU

¹ 学生会員 修 (工) 京都大学大学院 博士後期課程 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

² 正会員 博 (工) 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

³ 正会員 博 (工) 京都大学大学院 准教授 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

⁴ 正会員 博 (工) 京都大学大学院 助教 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

To design integrated flood risk management, flood risk assessment based on the economic damage is essential. In previous studies, the authors have developed a method to estimate a flood risk curve considering spatio-temporal distribution of rainfall by applying the Synthesis Probability Method (SPM) that estimates probability function of annual maximum flood peak discharge (AMF). Recently, the SPM was improved by introducing the relation between total rainfall and the duration time, and the estimated probability distribution of AMF with the improved SPM showed a better agreement with the probability distribution of observed AMF. This study extended the improved SPM to flood risk curve development and estimated a flood risk curve of the Ayabe city in the Yura-gawa River basin.

Key Words: *flood risk curve, rainfall pattern, probability function, copula*

1. はじめに

平成 24 年 7 月豪雨の熊本県白川・黒川や平成 25 年台風 18 号の由良川・桂川など、強大な台風や梅雨前線によって日本各地で現在の河川整備レベルと同等、あるいはそれを上回る洪水が発生し、浸水被害が生じている。さらに、気候変化によって計画規模を上回る超過洪水の発生頻度が増加することが懸念されている。このような超過洪水に対しては、河川整備に加えて土地利用規制や建築規制、水害保険の導入など複数のリスク低減策・分散策を講じる必要がある。

総合的な治水対策の効果を評価する手法としては、水害による経済的被害額とその年超過確率の関係を表す水害リスクカーブを推定し、対策前後の水害リスクカーブの変化から対策の効果を評価することが有効であると考えられる。既往の研究でも、水害リスクカーブを作成して治水対策の効果や気候変化による水害リスクの変化が推定されてきた^{1), 2), 3)}。この中で田中ら³⁾は、年最大洪水ピーク流量の確率分布を推定する総合確率法⁴⁾の考え方を援用することで、外水氾濫に大きな影響を与える降雨の時空間分布（以下、降雨パターン）を考慮して外水氾濫による水害リスクカーブを作成し、既存のダム治水効果を推定した。

一方で、総合確率法では降雨事象に対して対象とする継続時間内の流域平均総降雨量と流域内の降雨パターンが独立であるという仮定が置かれ、この仮定に起因して確率洪水ピーク流量が過大評価される可能性が指

摘されてきた⁵⁾。この課題に対して田中ら⁶⁾は、流域平均総降雨量の降雨継続時間に対する従属関係を考慮し、降雨継続時間に対する年最大総降雨量の条件付き確率分布関数を用いて総合確率法を改良した。そして、改良した総合確率法（以下、改良総合確率法）および従来の総合確率法を由良川流域に適用し、改良総合確率法を用いて推定した年最大洪水ピーク流量の確率分布関数が洪水ピーク流量データを頻度解析して得られる確率分布関数を適切に表現することを示した。改良総合確率法は従来の総合確率法よりも降雨量と降雨パターンの関連を適切に考慮しているため、改良総合確率法を援用して水害リスクカーブを作成することでより合理的な水害リスクカーブが得られると考えられる。これは、水害リスク評価に関わる種々の不確実性の中で外力の設定に関する不確実性の低減に貢献することになる。

そこで本研究では、改良総合確率法⁶⁾をもとにした水害リスクカーブを由良川流域で作成し、従来の総合確率法を援用して得られる水害リスクカーブと比較する。田中ら³⁾では 5 つの降雨パターンのみを用いて水害リスクカーブを作成したが、洪水に寄与する降雨パターンは多様であると考えられるため、本研究では降雨データが得られる過去 43 年間に発生したすべての降雨事象の降雨パターンを用いる。

また、田中ら⁶⁾では降雨継続時間を有限個の区間に分割して各区間での年最大総降雨量の条件付き確率分

布を推定していたが、本研究では接合分布関数⁷⁾を用いて降雨継続時間に対する総降雨量の条件付き確率分布を推定する方法も検討し、降雨継続時間を分割する方法と同様の水害リスクカーブが得られることを示す。

2. 改良総合確率法を援用した水害リスクカーブの作成法

(1) 浸水被害額の確率分布の導出

2. では、田中ら⁶⁾で導出した改良総合確率法の洪水ピーク流量を浸水被害額に置き換えて、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過程を示す。本節ではまず、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) 降雨が発生したとき、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。

ここで、 $r(x, y, t)$ を位置 x, y の時刻 t での降雨強度とし、降雨パターン $\xi(x, y, t)$ を以下のように定義する。

$$r(x, y, t) = r_a \xi(x, y, t), \quad (x, y) \in A, \quad 0 \leq t \leq d \quad (1)$$

ここで、 A は対象とする流域である。 $\xi(x, y, t)$ は

$$\int \int_A \left(\int_0^d \xi(x, y, t) dt \right) dx dy = S \quad (2)$$

となるように正規化されているとする。ただし、右辺の S は、対象としている流域の流域面積である。また、 d を次のように定義する。

$$d = \sup\{t | \xi(x, y, t) > 0, \exists (x, y) \in A, t > 0\} \quad (3)$$

すなわち、 d は降雨開始時刻を 0 として、流域中のどこかの地点で降雨が発生しているような最大の時刻として表される。

降雨パターン、および総降雨量と浸水被害額の関係に関して以下の仮定を置く。

仮定 2) 降雨パターンは多様であるが、 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において、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。

まず仮定 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 $\text{Prob}[m > m_1]$ は、 i 番目の降雨パターン $\xi_i(x, y, t)$ が生起する確率 p_i 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降雨パターン i についてとることで、次式とし

て得られる。

$$\text{Prob}[m > m_1] = \sum_{i=1}^N p_i \text{Prob}[r_a > r_{a,i}(m_1) | d = d_i] \quad (4)$$

ここで $r_{a,i}(m_1)$ は、降雨パターンが ξ_i に固定されていて、総降雨量 r_a を変化させたときに、浸水被害額 m 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 $r_{a,i}(m_1)$ を求めることができる。

(4) 式の左辺は、浸水被害額 m の超過確率を表しているので、 m 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以下の式によって得られる。

$$1 - G_M(m) = \sum_{i=1}^N p_i [1 - G_{R_a|D}(r_{a,i}(m) | d_i)] \quad (5)$$

総合確率法では、 $G_{R_a|D}(r_a | d)$ に対して降雨パターンによらない同一の分布関数を用いるが、改良総合確率法では降雨継続時間の条件付き確率分布関数を用いる⁶⁾。

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 (5) 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、

$$F_M(m) = \exp[-\mu_a \Delta t (1 - G_M(m))] \quad (6)$$

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。(6) 式に (5) 式を代入すると

$$F_M(m) = \exp \left[-\mu_a \Delta t \sum_{i=1}^N p_i (1 - G_{R_a|D}(r_{a,i}(m) | d_i)) \right] \quad (7)$$

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、(7) 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。

田中ら⁶⁾では、次節に示すように、降雨継続時間を分割することで降雨継続時間と総降雨量の同時確率分布を用いずに年最大浸水被害額の確率分布を求めた。本研究では、4. で接合分布関数を用いて総降雨量と継続時間の同時確率分布関数を設定し、それから $G_{R_a|D}(r_a | d)$ を導いて 5. で年最大浸水被害額の確率分布を求めるとともに、田中ら⁶⁾の方法で得た確率分布と比較する。

図-1 由良川流域の流域図（赤線：河道網，黒点：国交省の地点雨量データ）

(2) 降雨継続時間に対する年最大総降雨量の条件付き確率分布を用いた年最大浸水被害額の確率分布の導出

$G_{R_a|D}(r_a|d)$ を得るためには，一般的には総降雨量と継続時間の同時確率分布関数を得ることが基本であるが，総降雨量と継続時間の同時生起確率を適切に表現する関数形を求めることが難しい場合がある．その場合は，同時確率分布関数が求まらなくても，降雨継続時間ごとの年最大総降水量の確率分布を求めることで年最大浸水被害額の確率分布を得ることができる⁶⁾．まず，降雨継続時間 d を離散化して考え， $G_{R_a|D}(r_a|d)$ の関数形を次のように推定する．まず，降雨継続時間を J 個の半開区間に分割し，小さい方から j 番目 ($j = 1, 2, \dots, J$) の降雨継続時間区間を $\mathcal{D}_j$ とおく． $d_i \in \mathcal{D}_j$ なる d_i が与えられたときの総降雨量の条件付き確率分布関数を $G_{R_a|D}(r_a|d_i) = G_{R,j}(r_a)$ とする．降雨継続時間区間 $\mathcal{D}_j$ での年最大総降雨量 r が複合ポアソン過程に従うとすると，その確率分布関数 $F_{R,j}(r)$ は

$$F_{R,j}(r) = \exp[-\mu_j \Delta t (1 - G_{R,j}(r))] \quad (8)$$

となる． μ_j は降雨継続時間区間 $\mathcal{D}_j$ に含まれる降雨の単位時間あたりの発生率である．

この発生率 μ_j は以下によって求める．仮定 3) により，降雨の継続時間 d_i が取り得る値は N 個となるので，降雨が発生したときに降雨継続時間 d_i が降雨継続時間区間 $\mathcal{D}_j$ に含まれる確率 η_j は

$$\eta_j = \sum_{i \in I_j} p_i, \quad I_j = \{i | 0 \leq i \leq N, d_i \in \mathcal{D}_j\} \quad (9)$$

となる．降雨事象の発生率が μ_a なので， μ_j は η_j を用いて $\mu_j = \mu_a \eta_j$ と表すことができる．これと (8) 式を (7) 式の右辺に代入し，降雨パターン ξ_i の降雨継続時間 d_i が含まれる降雨継続時間区間の区間番号を $j(i)$ と表記すると

$$\begin{aligned} & F_M(m) \\ &= \exp \left[-\mu_a \Delta t \sum_{i=1}^N p_i (1 - G_{R,j(i)}(r_{a,i}(m))) \right] \\ &= \prod_{i=1}^N \exp \left[-\mu_{j(i)} \Delta t (1 - G_{R,j(i)}(r_{a,i}(m))) \right]^{p_i / \eta_{j(i)}} \end{aligned}$$

図-2 由良川下流域の資産分布図（黒丸は流出モデルによる流量と浸水被害額の関係を調べる地点）

$$= \prod_{i=1}^N F_{R,j(i)}(r_{a,i}(m))^{p_i / \eta_{j(i)}} \quad (10)$$

となり，年最大総降雨量の確率分布関数から年最大浸水被害額の確率分布関数が得られる．なお，従来の総合確率法で導かれる年最大浸水被害額 $M_{\max}$ の確率分布関数 $F_M(m)$ は

$$F_M(m) = \prod_{i=1}^N F_R(r_{a,i}(m))^{p_i} \quad (11)$$

と表される．ここで， $F_R(r)$ はあらかじめ定めた降雨継続時間 T 内の年最大総降雨量 r の確率分布関数である．

3. 対象領域の選定

本研究では，図-1 に示した由良川流域を対象とする．図-1 中の黒点で示した国交省の雨量観測地点の 43 年分の雨量データを用い，ティーセン分割によって降雨データを作成した．年最大浸水被害額の確率分布を推定するためには，様々な降雨パターンに対して流出計算と氾濫計算を実施して浸水被害額を推定する必要があるが，対象流域によっては，氾濫計算をしなくても，流出計算で得られる水理量によって浸水被害額が推定できる地域があると考えられる．以下では，そのような地域を検討して対象地域を決定する．

図-2 に田中ら³⁾ で得られた由良川下流部の資産空間分布図を示す．図-2 中の (A)，(B)，(C) は下流域であり上流ブロックの氾濫の影響を受けるため，流出計算による流量で浸水被害額を代表することは難しいと考えられる．そこで図-2 中の (D) 綾部地域に対して，全降雨パターン中で様々な降雨継続時間をもつ 41 個の豪雨事象の降雨パターンを用い，流出モデルから得られるブロック内最下流地点（図-2 中の (D) の黒丸地点）の洪水ピーク流量と流出計算結果の流量から氾濫モデルおよび治水経済調査マニュアル⁸⁾ によって得られる浸水被害額の関係調べた．降雨流出モデルおよび氾濫モデルは，分布型流出モデル 1K-DHM⁹⁾，流出モデルをネスティングする降雨流出・氾濫一体モデル¹⁰⁾ をそれぞれ用いた．得られたブロック内最下流地点の洪

図-3 ブロック (D) の最下流地点 (図-2 中のブロック (D) の黒丸地点) の洪水ピーク流量と最大氾濫量の関係 (それぞれの線は 41 個の各降雨パターンで総降雨量を引き伸ばした結果を表す。)

水ピーク流量と浸水被害額の関係を図-3 に示す。図-3 から洪水ピーク流量と浸水被害額の関係が降雨パターンによらず一意に得られることがわかる。これは、綾部市周辺が急峻な山地地形であるために、ピーク時刻の河川水位 (流量) が浸水に対して支配的であるためと考えられる。以下では、綾部地域の最下流地点の洪水ピーク流量とブロック (D) 内の浸水被害額が降雨パターンによらない一意な関係をもつことを利用して、綾部市周辺の水害リスクカーブを作成する。

4. 綾部地域での水害リスクカーブの作成

2., 3. の結果を用いて、改良総合確率法を援用して (7) 式あるいは (10) 式から綾部地域の水害リスクカーブを作成する。水害リスクカーブを作成する場合、降雨量の確率分布と降雨パターンごとの降雨量と浸水被害額の関係の 2 つが必要となる。

(1) 総降雨量と浸水被害額の関係の導出

3. で得られた綾部地域の最下流地点の洪水ピーク流量 Q_p と浸水被害額 m の関係を用いて、41 個の降雨パターンで洪水ピーク流量 Q_p に対応する浸水被害額 $m_i(Q_p) (i = 1, 2, \dots, 41)$ を平均し、それらを線形内挿して両者の関係 $m(Q_p)$ を求めた。これを用いて、総降雨量 r_a と浸水被害額 m の関係 $r_{a,i}(m)$ を以下の手順で推定した。

- 1) $i (= 1, 2, \dots, N)$ 番目の降雨パターンの降雨量 $r_{a,i}(x, y, t)$ を、総降雨量が 1 となるように $\xi_i(x, y, t)$ に正規化する。
- 2) 正規化した降雨パターン $\xi_i(x, y, t)$ を固定して、総降雨量 r_a をかけ合わせることで、総降雨量 r_a の降雨データを作成する。
- 3) 作成した降雨データから流出モデルを通してブロック (D) 内の最下流地点の洪水ピーク流量 $Q_{p,i}$ を得る。
- 4) 洪水ピーク流量 Q_p と浸水被害額 m の関係 $m(Q_p)$ から浸水被害額 m を推定する。
- 5) r_a を大きくしていき、2) ~ 4) を繰り返すことで降雨パターン ξ_i での総降雨量 r_a と浸水被害額 m の

図-4 5732 通りの降雨パターンに対する対象降雨継続時間内の総降雨量と浸水被害額の関係 (緑線: 12 時間雨量のみを引き伸ばした場合 (対象時間は 12 時間), 赤線: 降雨継続時間全体の総雨量を引き伸ばした場合 (対象時間は降雨継続時間全体))

関係 $r_{a,i}(m)$ を得る。

手順 1) ~ 5) で得られた総降雨量 r_a と浸水被害額 m の関係 $r_{a,i}(m)$ を図-4 に示す。降雨パターンは過去 43 年間の降雨データから、降雨量を十分大きな 1,000mm まで引き伸ばしたときの浸水被害額が 800 億円以上となる 5,732 個のパターンを用いた。従来の総合確率法を援用する場合は、降雨継続時間を固定する必要があるため、本研究の対象流域 (853km²) に応じて継続時間を 12 時間とし、各降雨パターンで降雨量が最大となる 12 時間の降雨量のみを引き伸ばす。一方、改良総合確率法を援用する場合は、各降雨パターンの降雨継続時間全体の降雨量を引き伸ばす。図-4 から、12 時間雨量を引き伸ばした場合 (緑線) の方が、手順 1) ~ 5) を用いた場合 (赤線) に比べて同じ総降雨量に対する浸水被害額が大きいことがわかる。これは、従来の総合確率法を援用する場合、12 時間雨量のみを引き伸ばすため、降雨継続時間全体の降雨量を同じ雨量まで引き伸ばす場合に比べて 12 時間内の降雨強度が大きく引き伸ばされ、洪水ピーク流量が大きくなるためである。

(2) 総降雨量の確率分布関数の導出

次に、総降雨量の確率分布を求める。従来の総合確率法を援用した水害リスクカーブでは、綾部地域最下流端の流域面積 (853km²) に応じて降雨継続時間を 12 時間とし、年最大 12 時間雨量の確率分布を GEV 分布に当てはめた。一方、改良総合確率法を援用した水害リスクカーブを作成するためには、(7) 式で用いる継続時間 d に対応する一雨雨量の条件付き確率分布関数、または (10) 式で用いる区間的な降雨継続時間ごとの年最大総降雨量の確率分布関数を得る必要がある。本研究では比較のため、以下の手順で両方の確率分布関数を求めて水害リスクカーブを推定する。

a) 年最大総降雨量の確率分布を用いる方法

まず、(10) 式を計算するために用いる降雨継続時間に対する年最大総降雨量の条件つき確率分布関数を得る手順を以下に示す。

図-5 年最大12時間雨量の累積分布関数（緑太線）と各降雨継続時間区間内ごとの年最大総降雨量の確率分布関数

- 1) データが得られる過去 n_y 年分の降雨事象を計 N 個用意する．
- 2) 降雨継続時間区間 D_j ($j = 1, 2, \dots, M$) を決定する．
- 3) 年 y ($y = 1, 2, \dots, n_y$) の降雨事象で降雨継続時間が区間 D_j に含まれる降雨事象の年最大値雨量 $r_{\max, j, y}$ を抽出し、これら n_y 個の年最大値を頻度解析して降雨継続時間区間 D_j に対する年最大総降雨量の条件付き確率分布 $F_{R_a, j}(r)$ を推定する．

改良総合確率法の降雨継続時間の分割は田中ら⁶⁾と同様に降雨継続時間区間数を2個、4個、6個、9個とした4個に対してリスクカーブを算定した（降雨継続時間の範囲および諸量は田中ら⁶⁾参照）．降雨継続時間を5時間ごとに9個に分割した場合の各区間の降雨の年最大総降雨量の確率分布関数、および年最大12時間雨量の確率分布関数を図-5に示す．確率分布は最尤法によって全区間でGEV分布を当てはめた．図-5から、同じ再現期間に対する年最大12時間雨量は、継続時間区間ごとの条件付き分布の雨量に比べて大きいことがわかる．これは、年最大12時間雨量が継続時間12時間以上の降雨も対象とするためであると考えられる．得られた確率分布と $r_{a, i}(m)$ から(10)式によって水害リスクカーブを推定する．

b) 一雨雨量と継続時間の同時確率分布を用いる方法
一方、接合分布関数を用いることで、任意の降雨継続時間 d に対する条件付一雨雨量の確率分布関数を推定して(7)式から水害リスクカーブを得ることもできる．接合分布関数は、多次元同時確率分布関数とそれぞれの変数の周辺分布の関係を表す関数であり、一雨雨量 R_a および降雨継続時間 D の同時確率分布関数 $G_{R_a D}(r_a, d)$ は、接合分布関数 C および、それぞれの周辺分布関数 $G_{R_a}(r_a)$ 、 $G_D(d)$ を用いて

$$G_{R_a D}(r_a, d) = C(G_{R_a}(r_a), G_D(d)) \quad (12)$$

と表すことができる⁷⁾．接合分布関数の利点は、周辺分布と変数間の依存構造を表す接合分布関数のパラメータを分けて推定することができる点である．まず周辺分布 $G_{R_a}(r_a)$ および $G_D(d)$ に対して、指数分布、ガンマ分布、一般化パレート分布を最尤法によって当ては

図-6 降雨継続時間 d と一雨雨量 r の同時確率分布 $G_{R_a D}(r, d)$ から発生させた3000個の標本（赤点）と観測データ（黒点）

め、AICによってどちらも一般化パレート分布を選択した．接合分布関数 C の関数形は数多く提案されているが⁷⁾、本研究では一つのパラメータで変数間の多様な依存構造を表すことができるアルキメデスコピュラの中で、最尤推定によるAICの値から、以下の式で表されるグンベルコピュラ⁷⁾を選択した．

$$G_{R_a D}(r_a, d) = e^{-\{(-\log G_{R_a}(r_a))^{\theta} + (-\log G_D(d))^{\theta}\}^{1/\theta}} \quad (13)$$

ここで、 θ はグンベルコピュラのパラメータである．推定した同時確率分布 $G_{R_a D}(r_a, d)$ から発生させた3000個の標本および観測データを図-6に示す．図-6から、降雨継続時間および一雨雨量の相関構造が $G_{R_a D}(r_a, d)$ によって適切に表現されていることがわかる．観測データおよび推定した同時確率分布のスピアマンの順位相関係数は、それぞれ0.392および0.370となった．降雨継続時間に応じた一雨雨量の条件付き確率分布関数 $G_{R_a|D}(r_a|d)$ は、同時確率分布 $G_{R_a D}(r_a, d)$ の確率密度関数 $g_{R_a D}(r_a, d)$ および降雨継続時間 D の周辺確率密度関数 $g_D(d)$ を用いて次式で得られる．

$$G_{R_a|D}(r_a|d) = \frac{1}{g_D(d)} \int_{-\infty}^{r_a} g_{R_a D}(r, d) dr \quad (14)$$

総降雨量 r_a と浸水被害額 m の関係 $r_{a, i}(m)$ および $G_{R_a|D}(r_a|d)$ を用いて(7)式から水害リスクカーブを計算する．

5. 従来の総合確率法および改良総合確率法を援用して推定した水害リスクカーブの比較

改良総合確率法を援用して、一雨雨量と降雨継続時間の同時確率分布、降雨継続時間区間に対する年最大総降雨量の条件付き確率分布から推定した水害リスクカーブ、および従来の総合確率法を援用して年最大12時間雨量の確率分布から推定した水害リスクカーブを図-7に示す．従来の総合確率法を援用して算定した水害リスクカーブ（赤線）は、改良総合確率法を援用して推定した水害リスクカーブ（他の曲線群）よりも同じ再現期間に対する確率浸水被害額を大きく算定していることがわかる．これは図-5に示すように、同じ再現期間に対する年最大12時間雨量が継続時間の条件付き年

図-7 従来の総合確率法を援用して作成した水害リスクカーブ（赤線）および改良総合確率法を援用して作成した水害リスクカーブ（緑線、青線、橙色線、水色線：降雨継続時間をそれぞれ2分割、4分割、6分割、9分割した場合、黄色線：接合分布関数を用いた場合）

最大総降雨量に比べて大きいためである。さらに、従来の総合確率法を援用する場合に用いる総降雨量と浸水被害額の関係（図-4中の緑線）は、降雨継続時間に対する条件付確率分布を用いる場合（図-4中の赤線）に比べて同じ総降雨量に対する浸水被害額が大きいため、同じ再現期間に対する浸水被害額も大きくなる。これらの特徴は、従来の総合確率法で対象とする継続時間を変えても同様であり、継続時間を固定する従来の総合確率法で改良総合確率法を援用した場合と同様の確率分布を得ることは難しい。これらは年最大洪水ピーク流量に対して田中ら⁶⁾で得られた結果と共通するが、年最大総降雨量の確率分布の裾に依存する水害リスクカーブ作成に対しても総合確率法の改良が大きな影響を与えることがわかった。

一方で、接合分布関数等を用いて一雨雨量と降雨継続時間の同時確率分布を得ることができる場合は、同時確率分布を用いることで一つのリスクカーブを得ることができる。降雨継続時間を複数の区間に分割した場合のリスクカーブは、分割数が多いほど適切なリスクカーブが得られることになるが、ここでは9分割した場合と同時確率分布から得たリスクカーブが概ね同様のリスクカーブとなった。

最後に、福知山河川国道事務所の過去の主要洪水記録¹¹⁾と推定したリスクカーブによる浸水被害の発生頻度を比較する。福知山河川国道事務所によると、由良川流域は1896年から2015年までの120年間に17回浸水被害を受けており、浸水被害額がゼロを超える年超過確率は0.142となる。一方、図-7から、改良総合確率法（降雨継続時間4分割以上）を援用して得られたリスクカーブと同時確率分布から得られたリスクカーブで浸水被害額がゼロを超える年超過確率は0.0710～0.130となった。一方、従来の総合確率法による年超過確率は0.417となった。浸水被害の年発生確率、すなわち浸水被害額がゼロを超える年超過確率を比較すると、総降雨量と降雨継続時間の関連を考慮して推定したり

リスクカーブによる浸水被害の発生頻度は、浸水被害記録と整合すると考えられる。以上から、総降雨量と降雨継続時間の関連を考慮することで、より合理的な水害リスクカーブを推定することができると考える。

6. おわりに

本研究では、田中ら⁶⁾によって改良された総合確率法を援用して様々な降雨パターンを用いて水害リスクカーブを作成する方法を示し、従来の総合確率法を用いて作成した水害リスクカーブと比較した。その結果、改良総合確率法を援用することで、従来の総合確率法を援用する場合に比べてより合理的な水害リスクカーブが得られることがわかった。また、接合分布関数を用いることで、一雨雨量と降雨継続時間の同時確率分布からも水害リスクカーブを推定することができるようになった。水害リスクカーブを推定する際は、流域に応じて総降雨量と降雨パターンとの関連を考慮することで合理的な水害リスク評価につながると考えられる。

参考文献

- 1) 柿本竜治, 田代達郎, 山田文彦, 藤見俊夫: 土地利用の空間分布推定の曖昧性を考慮した水害リスクカーブ生成システムの構築, 都市計画論文集, Vol. 46, No.3, pp. 931-936, 2011.
- 2) 平野淳平, 大楽浩司: 降水量頻度分布を考慮した水害リスク評価手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No.4, I.1507-I.1512, 2014.
- 3) 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), Vol. 71, No. 4, I.1483-I.1488, 2015.
- 4) 土木学会水工学委員会 日本のかたと河川技術を知る(利根川) 編集委員会: 日本のかたと河川技術を知る～利根川～, 2.3.4 基本高水の算出方法, pp.66-75, 土木学会, 2012.
- 5) 大町利勝: 計画洪水流量決定手法に関する一考察, 水文・水資源学会誌, Vol. 17, No. 2, pp.170-179, 2004.
- 6) 田中智大, 立川康人, 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), Vol. 71, No.2, pp.63-71, 2015.
- 7) 塚原英敦: 接合分布関数(コピュラ)の理論と応用, 21世紀の統計科学(国友直人, 山本拓監) Vol. III 数値・計算の統計科学(北側源四郎, 竹村彰通編), 第5章, 東京大学出版会, pp.101-140, 2008.
- 8) 国土交通省 河川局: 治水経済調査マニュアル(案), p. 91, 2005.
- 9) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学分野: 1K-FRM/DHM, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html> (2015/9/30 確認.)
- 10) 田中智大, 立川康人, 萬和明: 分布型流出モデルをネスティングする流出・氾濫一体型モデルの構築, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol. 70, No. 4, I.1495-I.1500, 2014.
- 11) 福知山河川国道事務所: 主要洪水記録, http://www.kkr.mlit.go.jp/fukuchiyama/river/shiryokan/kouzui_kiroku.html (2015/9/30 確認.)

(2015.9.30 受付)