土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I_1483-I_1488, 2015.

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

A FlOOD RISK CURVE DEVELOPMENT FOR INUNDATION DISASTER CONSIDERING SPATIO-TEMPORAL RAINFALL DISTRIBUTION

田中 智大[1]・立川 康人[2]・萬 和明[3]
Tomohiro TANAKA, Yasuto TACHIKAWA and Kazuaki YOROZU

[1] 学生会員 修 (工) 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
[2] 正会員 博 (工) 京都大学 教授 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
[3] 正会員 博 (工) 京都大学 助教 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

To manage flood disaster with an exceeding designed level, risk control based on appropriate risk assessment is essential. For probabilistic assessment of economic damage by flood disaster, a flood risk curve plays an important role, which is a relation between exceedance probability (magnitude of flood) and flood inundation damage. This research proposes a method to develop a flood risk curve, considering spatio-temporal distribution of precipitation. The developed method was applied to the Yura-gawa river basin in Kyoto, Japan, and risk curves of the basin with/without the effect of the existing dam were examined.

Key Words: *economic damage, probability function, inundation model, risk curve*

1. はじめに

将来の気候変化による豪雨の強大化によって，現在の整備レベルを上回る超過洪水の発生が懸念されている．超過洪水による洪水災害リスクを管理するためには，流域のもつリスクを適切に評価し，リスクを低減または分散する方策を講じることが重要となる．

地震のリスク評価では，まず複数の想定地震に対して被害額と被害をもたらす地震の発生確率の関係であるイベントカーブを作成する．次に，イベントカーブによる地震被害額の不確実性をある確率分布によって考慮し，被害額とその年超過確率の関係を示すリスクカーブを作成する．この地震リスクカーブは，地震保険の設計や国家として対応しなければいけないリスクの把握など，リスクの分担を考える基本情報となっている [1)]．洪水被害においても，降雨極値の確率的特性と被害額の関係を作成する技術を確立し，治水施設設備や都市・地域計画，損害保険などを組み合わせたリスク分散を図る必要がある．この場合，降雨の時空間分布によって被害額が大きくなるため，それを適切に組み込んだリスクカーブの作成が重要な課題となる．

既往の研究では，氾濫解析モデルを活用して降雨極値の統計的特性と浸水被害額の関係に基づいた浸水リスク分析が行われている [2)3)4)]．特に寺本ら [3)] は，確率降雨強度式から得られる様々な再現期間の中央集中型の降雨を用いて多数の氾濫計算を行い，土地利用規制の効果を浸水被害額の変化として分析している．ただし，こうした既往の研究は，異なる時空間分布をもつ降雨が浸水被害額の確率分布に与える影響を考慮していない．

降水量の時空間分布を考慮して，ある期間内の年最大総降雨量の確率分布から年最大洪水ピーク流量の確率分布を推定する手法として総合確率法がある [5)]．本研究では総合確率法を拡張することで，降雨の時空間分布を考慮して年最大総降雨量の確率分布を年最大浸水被害額の確率分布に変換し，被害額とその超過確率との関係を作成する手法を示す．また，ここで得られる被害額の確率分布が地震に対する損害保険で用いられるリスクカーブに相当することを示す．最後に，開発した変換手法を京都府の由良川流域（1882km^2）に適用し，由良川流域の水害リスクカーブを作成する．また，由良川上流域に位置する大野ダムが存在する場合としない場合とでリスクカーブを比較し，大野ダムの治水経済効果を試算する．

2. リスクカーブの作成方法

一般に，水文頻度解析では対象とする水文量のサンプルを用意し，サンプルに適合する確率分布関数を当てはめる．水害リスクカーブを作成するためには，水害の発生頻度に応じた浸水被害額のデータが多数必要となるが，確率分布を当てはめるのに十分な浸水被害データを用意することは難しい．そこで，ある降雨期間内の年最大流域平均総降雨量の確率分布をもとに降雨流出・氾濫モデルを介して年最大浸水被害額の確率分布を導出する手法を開発する．このとき，年最大総降雨量を流出・氾濫モデルに入力して得られる浸水被害

額が年最大浸水被害額になるとは限らない点に注意する必要がある．これは，同じ総降雨量でも降雨パターンによって浸水・氾濫の広がり方や最大浸水深の空間分布が異なり，算定される浸水被害額が異なるためである．

そこで，降雨の時空間パターンを考慮して年最大総降雨量を年最大洪水ピーク流量に変換する総合確率法を拡張して，降雨の時空間パターンを考慮した上で，ある降雨期間内の年最大総降雨量の確率分布から年最大浸水被害額の確率分布を得る手法を新たに開発する．

(1) 総合確率法を拡張した浸水被害額の確率分布の算定

総合確率法は，年最大総降雨量の確率分布から年最大洪水ピーク流量の確率分布を求める手法である．ここでは，椎葉ら[5]による総合確率法の数学的導出にならい，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を求める手法を述べる．

まず，以下の 4 つの仮定を設ける．

1) ある降雨期間内の総降雨量と降雨の時空間パターンは独立である．
2) 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．

1 つ目の仮定に対応して，位置 x,y の時刻 t での降雨強度 $r(x,y,t)$ を次のように表す．

$$r(x,y,t) = r_{\mathrm{a}}\xi(x,y,t), (x,y) \in A, 0 \leq t \leq T_{\mathrm{r}} \quad (1)$$

ここで A は対象とする流域，T_{r} は降雨期間，r_{a} は降雨期間 T_{r} 内の流域平均総降雨量，$\xi(x,y,t)$ は降雨の時間的・空間的分布パターンであり，

$$\int\int_A \left(\int_0^{T_{\mathrm{r}}} \xi(x,y,t)dt\right) dxdy = S \quad (2)$$

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，降雨の時空間分布について以下の仮定を置く．

3) 降雨の時空間パターン $\xi(x,y,t)$ 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 $\xi_i(x,y,t)$ が生起する確率を p_i とする．また，降雨期間は T_{r} として固定する．
4) 浸水被害を発生させるような降雨の発生は，単位時間あたりの発生確率が μ のポアッソン過程に従うとし，その降雨事象が発生したときの総降雨量 R_{a} は確率分布 $G_{R_{\mathrm{a}}}(r_{\mathrm{a}})$ に従うとする．ただし，浸水被害を発生させないような降雨も便宜上，浸水被害額 0 の被害を発生させる降雨と考える．

仮定 1) から 3) 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 が特定の被害額 m_1 を超える確率 $\mathrm{Prob}[M > m_1]$ 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の和として次式で求められる．

$$\begin{aligned}\mathrm{Prob}[M > m_1] &= \sum_{i=1}^{N} p_i \mathrm{Prob}[M > m_1 | \xi = \xi_i] \\ &= \sum_{i=1}^{N} p_i \mathrm{Prob}[r_{\mathrm{a}} > r_{\mathrm{a},i}(m_1)] \quad (3)\end{aligned}$$

ここで $r_{\mathrm{a},i}(m_1)$ 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 がちょうど m_1 になるような総降雨量を表している．仮定 2) によってそのような $r_{\mathrm{a},i}(m_1)$ を求めることができる．なお，$r_{\mathrm{a},i}(0)$ は浸水被害額が 0 となる総降雨量の中で最も大きい総降雨量とする．(3) 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，

$$\begin{aligned}1 - G_M(m) &= \sum_{i=1}^{N} p_i \mathrm{Prob}[r_{\mathrm{a}} > r_{\mathrm{a},i}(m)] \\ &= \sum_{i=1}^{N} p_i \left(1 - G_{R_{\mathrm{a}}}\left(r_{\mathrm{a},i}(m)\right)\right) \quad (4)\end{aligned}$$

が得られる．

仮定 4) により，浸水被害の発生も単位時間あたりの発生確率が μ で，事象が発生したときの浸水被害額の確率分布関数が (4) 式によって求められる複合ポアッソン過程になるため，年最大浸水被害額 M の確率分布関数 $F_M(m)$ は，

$$F_M(m) = \exp\left[-\mu\Delta t(1 - G_M(m)\right] \quad (5)$$

から計算できる．Δt は時間間隔であり，ここでは 1 年を表す．この式の右辺に (4) 式を代入すると

$$\begin{aligned}&F_M(m) \\ &= \exp\left[-\mu\Delta t \sum_{i=1}^{N} p_i \left\{1 - G_{R_{\mathrm{a}}}\left(r_{\mathrm{a},i}(m)\right)\right\}\right] \\ &= \prod_{i=1}^{N} \exp[-\mu\Delta t \left\{1 - G_{R_{\mathrm{a}}}\left(r_{\mathrm{a},i}(m)\right)\right\}]^{p_i} \quad (6)\end{aligned}$$

が得られる．仮定 4) から，総降雨量 R_{a} は複合ポアッソン過程に従い，年最大総降雨量 R_{a} の分布関数 $F_{R_{\mathrm{a}}}(r_{\mathrm{a}})$ は $G_{R_{\mathrm{a}}}(r_{\mathrm{a}})$ を用いて

$$F_{R_{\mathrm{a}}}(r_{\mathrm{a}}) = \exp\left[-\mu\Delta t \left(1 - G_{R_{\mathrm{a}}}(r_{\mathrm{a}})\right)\right] \quad (7)$$

と表される．これを (6) 式に代入すると

$$F_M(m) = \prod_{i=1}^{N} F_{R_{\mathrm{a}}}(r_{\mathrm{a},i}(m))^{p_i} \quad (8)$$

となり，年最大総降雨量の確率分布関数および各降雨パターンにおける総降雨量と浸水被害額の関係から，年最大浸水被害額の確率分布関数が得られる．さらに，$r_{\mathrm{a},i}(m)$ が十分大きければ，(8) 式は

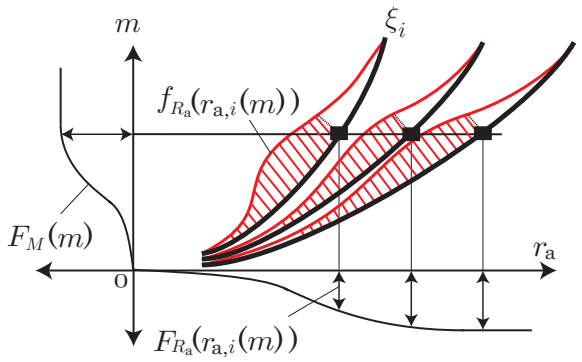

図-1 降雨期間 T_r 内の年最大雨量の非超過確率と年最大浸水被害額の非超過確率との関係（横軸下の曲線：降雨期間 T_r 内の年最大雨量の確率分布関数，縦軸左の曲線：年最大浸水被害額の確率分布関数），$f_{R_a}(r_{a,i}(m))$ は降雨期間 T_r 内の年最大雨量の確率密度関数．斜線部分は被害額 m に対する非超過確率 $F_M(m)$

$$F_M(m) = \sum_{i=1}^{N} p_i F_{R_a}(r_{a,i}(m)) \tag{9}$$

と近似できる．

(2) 計算手順

(8) 式から水害リスクカーブを求める方法を示す．

1) 事前に定めた降雨期間 T_r 内の年最大流域平均総降雨量の確率分布 $F_{R_a}(r_a)$ を求める．
2) 過去の降雨の中で代表的な降雨事象を N 個用意する．
3) i 番目の降雨パターンの降雨量 $r_{a,i}(x,y,t)$ を，(2) 式を満たすように $\xi_i(x,y,t)$ に正規化する．
4) 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 をかけ合せることで，総降雨量 r_a の降雨事象を作成する．
5) 作成した降雨事象から流出モデルを通して洪水ハイドログラフを得る．
6) 浸水・氾濫モデルを用いて浸水深を計算し，浸水被害額 m を計算する．
7) r_a を大きくしていき，1)〜6) 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 の関係 $r_{a,i}(m)$（**図-1** 中の太線群）を得る．

降雨パターン ξ_i の発生確率 p_i を定めれば (8) 式から，各降雨パターンで被害額 m に対応する降雨期間内の降雨量 $r_{a,i}(m)$ の非超過確率 $F_{R_a}(r_{a,i}(m))$ の重みつき相乗平均によって，年最大浸水被害額の確率分布関数 $F_M(m)$ を得ることができる．

3. 総合確率法とリスクカーブの関係

これまでリスクカーブは地震のリスク評価で主に用いられてきた．リスクカーブは，異なる発生確率をもつ複数の地震による被害額から作成したイベントカーブに対して，地震による被害額の算定に関する不確実性を表す予測誤差分布を用いてイベントカーブを修正することで得られる [1]．浸水被害の場合，降雨の時空間分布の影響によって被害額の確率分布に大きな不確実性が生じる．以下では，降雨の時空間分布による不確実性を考慮した総合確率法が，地震リスク評価で用いられてきたリスクカーブに相当することを示す．

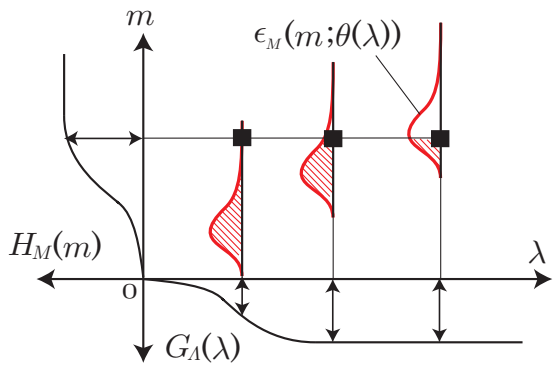

図-2 地震災害のリスクカーブ（横軸：地震の強度，縦軸：地震による被害額，横軸下の曲線：地震強度 λ の確率分布関数 $G_\Lambda(\lambda)$，縦軸左の曲線：被害額の非超過確率（リスクカーブ））

まず地震のリスクカーブの定義を示す [1]．強度 λ の地震に対する確率密度関数を $g_\Lambda(\lambda)$ とおく．地震による被害額 m の不確実性を考慮するために，λ の大きさによって発生する地震の被害額の確率密度を $\epsilon_M(m;\theta(\lambda))$ とおく．ここで，$\theta(\lambda)$ はパラメータである．$\epsilon_M(m;\theta(\lambda))$ としてベータ分布がよく用いられる．このとき，被害額の不確実性を考慮した地震の被害額の確率分布関数は

$$H_M(m_1) = \int_0^{m_1}\int_0^{\infty} g_\Lambda(\lambda)\epsilon_M(m;\theta(\lambda))d\lambda dm \tag{10}$$

として求められ，これがリスクカーブである．$H_M(m_1)$ は，被害額 m_1 に対する非超過確率を表す．

地震のリスクカーブの模式図を**図-2** に示す．地震災害では，同規模の地震に対する被害額の不確実性が大きいため，(10) 式に示したように様々な強度 λ の地震に対する被害額の非超過確率（**図-2** 中の斜線部分）を地震の発生確率と掛けて足し合わせることでリスクカーブを作成している．

一方，水害では同じ降雨量でも，降雨パターンによって浸水深が大きく異なり，これが水害リスク評価の大きな不確実性となる．そのため，(9) 式に示したように，多数の降雨パターンによる浸水被害額の非超過確率（**図-1** 中の斜線部分）を降雨パターンの発生確率 p_i と掛けて足し合わせることによって，降雨の時空間分布による不確実性を考慮している．このように，総合確率法を援用して推定される浸水被害額の確率分布は，地震による被害額の不確実性を考慮して作成されるリスクカーブに対応することがわかる．以下，(8) 式または (9) 式で示した確率分布を水害リスクカーブとしてリスク評価を行う．

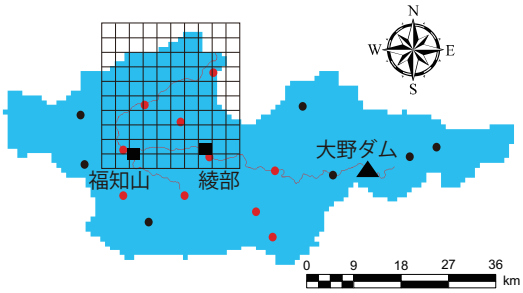

図-3 由良川流域全体図（水色の領域：由良川流域，赤線：河道網，四角：流量観測所，三角：大野ダム，赤丸：地点雨量観測所，黒丸：地点雨量観測所（2013 年台風 18 号時に欠測），網掛けの枠：氾濫計算領域）

4. 降雨流出・氾濫モデル

降雨と浸水被害額の関係を得るためには，降雨から氾濫までを計算できるシミュレーションモデルが必要となる．そこで，筆者らが開発した降雨流出・氾濫一体型のモデル[6]（以下，流出・氾濫モデル）を用いる．本研究の流出・氾濫モデルは，流出モデルを用いて 30 秒（約 1km）空間分解能で流域全体を計算し，その後，流域中の任意の領域の氾濫を，氾濫モデルによって 3 秒（約 100m）空間分解能で計算するネスティング型のシステムとなっている．ネスティング型の構造を用いることによって氾濫計算の範囲を限定することができ，計算時間を短縮することができるため，降雨と浸水被害額の関係を求めるために必要な多数回の計算を実現することができる．後述のように，本研究のリスクカーブ作成には 2 日間の降雨による氾濫計算を 200 回行ったが，ネスティング型のモデルはこれを 2.9GHz の CPU，コア数 32 の Linux が作動する並列計算機で約 20 時間で実現することができた．

流出モデルは分布型流出モデル 1K-DHM[7] であり，流域中の各セルは河道セルおよび斜面セルに分けられる．河道セルでは地表面流型のキネマティックウェーブモデル，斜面セルでは不飽和・飽和中間流[8] を考慮したキネマティックウェーブモデルによって流れを計算している．氾濫モデルは，河道セルで以下の 1 次元の局所慣性方程式[6)9)] を解く．

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA\frac{\partial (h+z)}{\partial x} + \frac{gn^2|Q|Q}{R^{4/3}A} = 0 \qquad (11)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad (12)$$

ここで，Q は流量，A は通水断面積，h は水深，z は河床高，g は重力加速度，n はマニングの粗度係数，R は径深である．それ以外の氾濫域セルでは 2 次元の局所慣性方程式を解く[6]．氾濫モデルでは，河道セルが計算領域上流端で流出モデルから流量を受け取り，計算領域内で側方流入量を受け取って河道流計算を行う．そして，水位が堤防高を越えた場合に越流が発生し，外水氾濫が計算される．氾濫モデルの計算領域下流端では，水位の境界条件を与える．

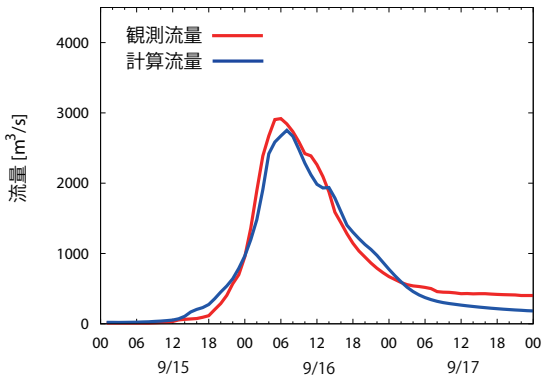

図-4 平成 25 年台風 18 号洪水の再現計算結果．綾部地点の観測流量と計算流量（赤：観測値，青：計算値）

表-1 降雨流出モデルのパラメータ[8]

パラメータ	値
等価粗度 n[m$^{-1/3}$/s]	0.494
飽和透水係数 k_a[m/s]	1.00×10^{-4}
土層厚 d_a[m]	0.603
土層厚 d_s[m]	0.599
透水係数比 β[−]	9.28

5. 流出・氾濫モデルの由良川流域への適用

4. で述べた流出・氾濫モデルを京都府の由良川流域に適用する．**図-3** に由良川流域の流域図を示す．由良川流域は昭和 28 年の台風 13 号や平成 16 年の台風 23 号などの大きな出水の度に浸水被害を受けてきた流域であり，昨年の台風 18 号でも床上浸水・床下浸水併せて 3855 棟の被害が発生した[10]．ここでは，平成 25 年台風 18 号による洪水を対象として，流量および氾濫規模の再現計算を行った．

(1) 流出モデルのパラメータ同定

1K-DHM のパラメータ同定は，平成 25 年台風 18 号の洪水と同程度の洪水規模であった平成 16 年の台風 23 号の洪水を対象に行った．国土交通省の綾部地点の H-Q 換算流量を観測値として与えて，SCE-UA 法[11] を用いた．同定したパラメータを**表-1** に示す．降雨データは，**図-3** に赤丸と黒丸で示す国土交通省の地点雨量観測所 17 地点の地点雨量データを用いてティーセン法によって作成した．また，綾部地点の上流域に位置する大野ダムの操作を考慮するため，大野ダムがピークカットを行った 10 月 20 日 10 時から 10 月 21 日 11 時までの大野ダムの放流量を大野ダム地点の流量として与えた．

(2) 台風 18 号による洪水流量・氾濫規模の再現計算

同定したパラメータ値を用いて平成 25 年台風 18 号による流出・氾濫計算を行った．降雨データは欠測値のなかった**図-3** 中の赤丸 10 地点の地点雨量データを用いて，ティーセン法によって作成した．また，平成 16 年と同様に大野ダムによるピークカットが行われたため，ダム放流量の時系列データを大野ダム地点の流量として与えた．**図-4** に綾部地点の観測流量と計算流量を示

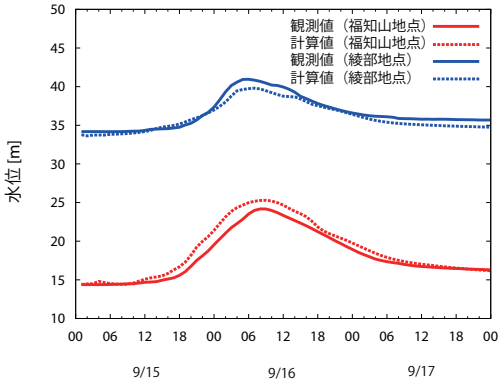

図-5 平成 25 年台風 18 号洪水の再現計算結果．綾部地点および福知山地点の観測水位と計算水位（実線：福知山地点，点線：綾部地点，赤：観測値，青：計算値）

す．観測流量と計算流量はよく一致している．Nash 指標は 0.97 となった．

次に，降雨流出モデルを**図-3** 中の網掛けの枠内の領域でネスティングして氾濫計算を行った．氾濫計算では，河道水位の計算値が観測値に合うように，河道の等価粗度を 0.045 とした．氾濫域の等価粗度は 0.05 とした．また，下流端の水位条件は観測値を与えた．**図-5** に，綾部地点および福知山地点の観測水位と氾濫モデルの河道流計算による計算水位を示す．計算水位は観測水位をおおむね再現した．**図-6** に氾濫計算による最大浸水深分布を示す．黒い太線で囲んだ範囲は，国土交通省 [10] による実測の浸水範囲であり，白抜きの三角点は氾濫計算で破堤を考慮した地点を表す．モデル内では，筆者が現地で確認した地点を含むセルの堤防高を，セルの幅にわたって越流開始時刻に 0m と設定して破堤を表現した．**図-6** から，浸水範囲はおおむね一致していることがわかる．面積も，実測値が 23.03km^2，計算値が 20.21km^2 となりおおむね一致した．

(3) 台風 18 号による浸水被害額の推定

計算された最大浸水深を用いて，平成 25 年台風 18 号による由良川流域の浸水被害額を推定した．国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ（平成 21 年度）[12] による 15 の土地利用分類に従い，治水経済マニュアル（案）[13] をもとに土地利用に応じて被害額を算定した．被害額を評価する土地利用として，水田・畑地・建物用地・ゴルフ場・幹線交通用地を考慮した．土地利用ごとに定められた浸水深別被害額を用いて，各セルの土地利用で最大浸水深に対応する被害額を算出し，それらを合計して対象領域の被害額とした．**表-2** に，項目ごとの浸水被害額の推定結果を示す．浸水被害額は合計で 582.45 億円と算定された．

平成 25 年台風 18 号と同程度の浸水範囲をもたらした平成 16 年の台風 23 号の水害統計調査 [14] によると，平成 16 年の京都府全体の水害被害額は約 617 億円と報告されている．台風 18 号の浸水被害額約 582 億円は，妥当な推定結果であると考えられる．

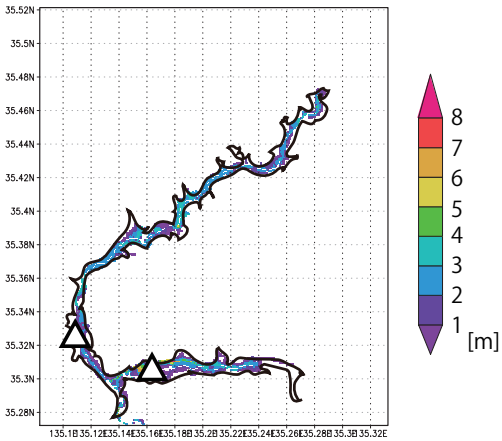

図-6 実測の浸水範囲（黒線内の領域）と最大浸水深分布の計算値の比較．

表-2 平成 25 年台風 18 号による被害額推定結果

土地利用	被害額 [億円]
水田	2.95
畑地	26.20
家屋	132.00
家庭用品	50.30
事業所償却・固定資産	23.00
ゴルフ場	0.00
公共土木施設	348.00
計	582.45

6. 由良川流域における水害リスクカーブの作成

由良川流域の水害リスクカーブを作成する．降雨期間は 2 日間とし，年最大総降雨量の確率分布は国土交通省の水文・水質データベースによる時間雨量の地点データを用いて，ティーセン法で求めた年最大流域平均 2 日雨量を用いて推定した．確率分布は最尤推定法および JackKnife 推定誤差を用いてグンベル分布を選択した．水害リスクカーブの作成に用いる降雨パターンは，由良川流域で主要な洪水を引き起こした 1972 年，1982 年，1983 年，1990 年，1995 年の 5 個の降雨事象の実績データを用いた．国土交通省の水文・水質データベースの時間雨量の地点データをティーセン法で流出計算と同じ 30 秒分解能に分布させて降雨の時空間分布を作成した．各降雨パターンに対して 10mm 間隔で降雨を引き伸ばし，400mm まで計 40 回流出計算と氾濫計算を実施した．

由良川は上流域に大野ダムがあるため，大野ダムの操作規則 [15] をもとにダムモデルを構築し，ダムがある場合とない場合の関係を計算した．なお，水害リスクカーブの作成では，破堤は考慮せず越流による被害を対象とした．**図-7** に，各降雨パターンでの総降雨量と浸水被害額の関係を示す．実線に由良川上流域の大野ダムを考慮しない場合，破線に考慮した場合の結果をそれぞれ示す．**図-7** から，同じ総降雨量に対する浸水

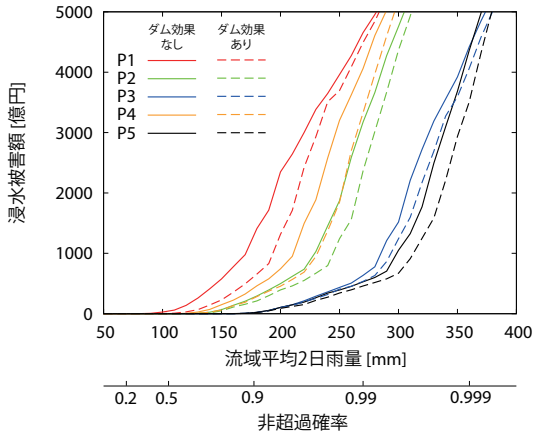

図-7 5つの降雨パターンによる年最大流域平均2日雨量およびその非超過確率と由良川流域の浸水被害額の関係（実線：ダムがない場合，点線：ダムがある場合）

被害額が，降雨パターンによって大きく異なることがわかる．また，それぞれの降雨パターンで大野ダムを考慮した場合の方が，同じ総降雨量に対する浸水被害額が小さいことがわかる．これは大野ダムの洪水調節効果によって被害が軽減したことを表す．

(8) 式を用いて作成した由良川流域の水害リスクカーブを**図-8** に示す．これは，降雨パターン $\xi_i(i=1,2,..,5)$ で算定した浸水被害額 m に対応する年最大 2 日雨量 $r_{\mathrm{a},i}(m)$ の非超過確率 $F_{R_\mathrm{a}}(r_{\mathrm{a},i}(m))$（**図-7** の下の横軸）の重み付き相乗平均値から算定される．各降雨パターンの生起確率は等確率とし，$p_i = 1/5$ とした．大野ダムの治水効果を評価するため，大野ダムのダム操作を考慮した場合とダムがない場合の 2 通りのリスクカーブを作成した．大野ダムの洪水調節効果によって，浸水被害額の超過確率が減少していることがわかる．大野ダムの貯水容量には上限があることから，超過確率が小さい大規模な水害に対しては両者の予想被害額の差が小さくなっている．**図-8** から，大野ダムがない場合の年最大浸水被害額の期待値は約 145 億円と推定され，ダムがある場合の期待値は約 80 億円と推定された．

7. おわりに

本研究では，リスク評価に基づいた総合的な治水対策評価を目的として，総合確率法を拡張した浸水被害額の確率分布作成手法を開発し，これがリスクカーブに対応することを示した．本手法により，洪水災害に大きく影響する降雨の時空間分布の影響を考慮したリスクカーブの作成が可能となった．さらに，京都府の由良川流域の浸水被害のリスクカーブを作成し，治水施設整備の経済効果を評価することができた．

謝辞：大野ダムの操作に関する情報を京都府から提供していただいた．記して謝意を表する．

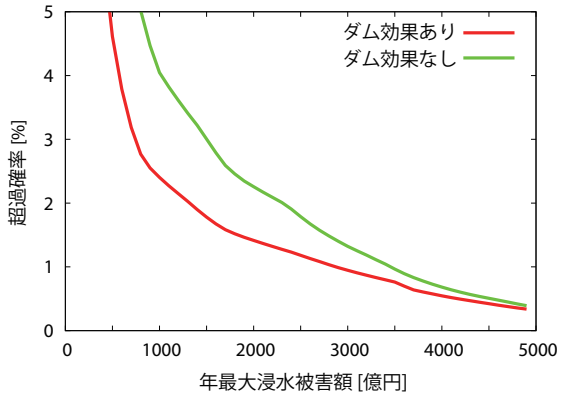

図-8 由良川流域のリスクカーブ（赤：ダムがある場合，緑：ダムがない場合）

参考文献

1) 兼森孝: 災害リスクのアセスメント：地震リスクの定量化, 防災の経済分析―リスクマネジメントの施策と評価（多々納，高木編），第 3 章，勁草書房，pp. 49-71, 2005.
2) 小林健一郎，寶馨: 洪水による被害推定手法の高度化に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No.53(B), pp. 7-14, 2010.
3) 市川 温, 寺本雅子, 沼間雄介, 西澤諒亮, 立川康人, 椎葉充晴: 水害危険度に基づく建築規制の費用便益評価土地利用規制との比較, 土木学会論文集 B, vol. 66, no. 2, pp. 145-156, 2010.
4) 佐藤歩，川越清樹，風間聡，沢本正樹: 降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol. 52, pp. 433-438, 2008.
5) 椎葉充晴，立川康人: 総合確率法の数学的解釈, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol. 69, No.2, pp. 101-104, 2013.
6) 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, 2014.
7) 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` (2014/9/30 確認.)
8) 立川康人, 永谷言, 寶馨: 飽和, 不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 48, pp.7–12, 2004.
9) Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J.: A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimentional flood inundation modeling, *Journal of Hydrology*, Vol.387, pp. 33-45, 2010.
10) 国土交通省近畿地方整備局河川部: 平成 25 年台風 18 号災害概要, pp. 1-10, 2013.
11) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284, 1994.
12) 国土地理院: 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ, `http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html` (2014/9/30 確認.)
13) 国土交通省 河川局: 治水経済調査マニュアル (案), p. 91, 2005.
14) 国土交通省 河川局: 水害統計調査, p. 3, 2004.
15) 京都府: 大野ダム操作規則, pp. 1-4, 1962.

(2014.9.30 受付)