

時空間相関を考慮した地先の水害リスクの評価方法に関する研究

京都大学・防災研究所 教授 多々納裕一
京都大学・防災研究所 特任助教 蔣 新宇

概要:

本研究では、複数の河川からの浸水や内水氾濫等、複数の洪水ハザードとその相関性を考慮した流域内各地先の水害リスクを計量化するための方法論を開発する。まず、複数の河川からの浸水や内水氾濫など複数の原因とその相関性を研究するために、豪雨の時空間分布を多次元確率分布として構成する方法を提示する。次いで、統合型シミュレーションモデルを用いて降雨の分布を流域内の各地先における被害へと変換する方法を開発する。さらに、以上の手法を組み合わせ、流域内の任意の地点における被害の確率分布を算定する洪水リスク評価の手法を開発する。最後に、淀川水系大津川流域を対象としたケーススタディを通じて本研究で提案した方法の適用可能性に関して検証を行う。

キーワード: 地先の水害リスク, 複数の洪水ハザード, 時空間相関, 計画降雨

1. 研究の目的

市街地の洪水に対する脆弱性を評価するためには、本川や支川など、複数の河川からの浸水や内水氾濫等の複数のハザードを考慮する必要がある。この際、流域内の河川がそれぞれ異なる洪水到達時間を持つことを考慮すれば、本川やそれぞれの支川、内水氾濫域の水害リスクを規定する降雨継続時間を一律に与えることはできない。このため、これらの複数のハザードを考慮して流域内の各地先の水害リスクを算定しようとする際には、少なくとも、各々のハザードごとに重要な降雨継続時間の同時生起分布を用いることが必要となる。本研究では、まず、豪雨の空間分布を多次元確率分布として構成する方法を提案する。その上で、降雨一流出氾濫被害という一連の現象を統一的にシミュレートできる統合型シミュレーションモデルを介して、降雨の確率分布を流域内各地先における被害の確率分布に変換し、水害リスクの空間分布を算定する方法を提示する。その上で、これら2つのモデルを統合し、流域内の任意の地点における水害リスクを評価するシステムを構築する。

2. 研究方法

(1) 中小規模流域における地先の水害リスク評価の方法論

計画降雨は、雨量、降雨の時間的パターンと降雨の地域分布をその構成要素として規定されるが、流域の面積が大きくない場合には、降雨の空間分布を考慮せず、流域内で空間的には均質の分布を想定することが多い。本研究でも、まずは空間分布に関してはこの仮定を採用する。このように考えると、流域内に存在する複数の河川からの氾濫や内水氾濫などの各々のハザードの特性を反映した降水量とその時間分布パターンをいかに構成するかが重要な課題となる。

複数の河川からの浸水や内水氾濫等の複数のハザードを考慮するために、これらのハザードの特性を、異なる洪水到達時間に対応付けて検討することとする。この考えを、図1を例として説明する。青色のエリアは、リスク評価の領域であり、赤いエリアは流出領域である。全体の領域の計画降雨は、図の上に示されている。リスク評価領域内のある地点（図中の☆の地点）は、三つの洪水ハザードによって影響を受けているものとしよう。相対的に小さい流域を持つA川流域（流域A）からの外水、相対的に大きい流域を持つB川流域（流域B）からの外

水、そして、内水氾濫である。内水氾濫の到達時間を1時間、流域Aにおける洪水到達時間は2時間、流域Bでは3時間としよう。この時、洪水ピーク流量は洪水到達時間内の総降水量に最も影響を受けると考えると、図1上部に記したハイトグラフのうち、流域Aからの氾濫リスクを規定する降水量は、赤色の枠囲みで示した連続2時間降水量となる。同様に、流域Bからの氾濫リスクに関しては、計画降雨の最大3時間降水量が氾濫リスクを規定する降水量(図1中、緑色の枠囲みで示した連続2時間降水量)となり、内水氾濫に関しては、時間最大降水量(図1中、紫色の枠囲みで示した1時間降水量)となる。

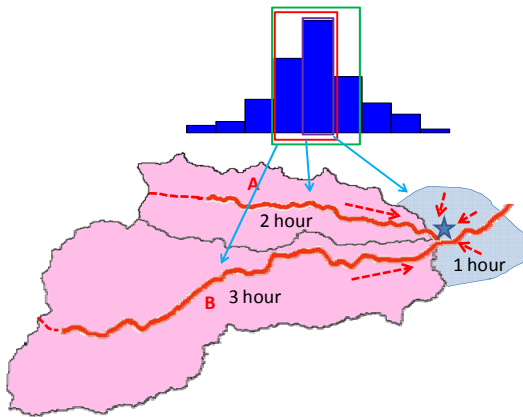


図1 複数のハザードから洪水リスクと計画降雨

従って、図1の例では、少なくとも、A・B両河川からの浸水や内水氾濫を考慮するために、計画降雨の最大1時間降雨量、最大2時間降雨量、最大3時間降雨量とそれらの相関関係を用いてハイトグラフの生起確率を特徴づけることが、地先(たとえば地点☆)における浸水リスクを再現するうえで重要となる。これは、リスク評価の領域の内水氾濫の確率分布が最大1時間降雨量の確率分布に、流域Aからの洪水の確率分布は最大2時間の確率分布に、流域Bからの洪水の確率分布は最大3時間の確率分布によって、最も影響を受けるからである。任意のハイトグラフをそれぞれのハザードから求まる洪水到達時間内の総降水量を特性量として持つ同時確率分布(この例では、最大1時間、2時間と3時間最大降水量の同時分布)によって特徴づければ、複数のハザードからの洪水の確率分布を反映することができる。

a) 洪水到達時間

一般に洪水到達時間は流域の力学的最遠地点に降った雨水の擾乱が流域下流端に伝播する時間と定義される。洪水到達時間を計算するために、Kraven式、土研式、角屋式など、多くの方法が提案されてきた。これら式を使えば、流域の面積、川の長さや土地利用などの流域の自然の状況に基づいて、洪水到達時間を見積もることができる。

b) コピュラ法

統計学におけるコピュラ(copula)とは、多変数の同時分布関数とその周辺分布関数の関係を示す関数のことである。コピュラの方法は、相関を測定し、多変量分布を構築するために有効な方法である。二変数の場合、連続的な確率変数の任意の組(x, y)累積分布関数H(x, y)は、式(1)のように書くことができる(Nelsen, 2006)。

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \quad x, y \in \mathbb{R} \quad (1)$$

F(x)とG(y)は、連続的な周辺分布である場合、そのC: [0, 1] → [0, 1]はのコピュラであること。この方法では、同時分布はコピュラ関数と周辺分布に分離する。そして、コピュラによる相関関係と周辺分布を独立に選択できる。

コピュラ方法は、金融分野で主に使っている。河川工学や水文学のエリアではSalvadori G, et al. (2004, 2007), Genest C, et al. (2007), Favre A C, et al. (2004)などのように、河川流量の相関を考慮した河川からの溢水の生起確率を求める研究などが進められてきている。降雨についても同様に、Ghosh S (2010), Serinaldi F (2009)などがあるが、本研究で対象とするように流域内の任意の地点における水害のリスクを推計するための方法論を提示した研究は存在しない。

(2) 降雨—流出—氾濫の一連の過程を扱う統合型シミュレーションモデルの開発

複数の河川からの浸水や内水氾濫等の複数のハザードから洪水リスクを評価するにあたっては、流出流域とリスク評価領域とを統合的に考慮する必要がある。特に山地部と都市部が隣接するような場合には、山地からの流出と河川からの氾濫による洪水は密接に関連している。流域からの降雨は、外水の誘因である、都市の降雨は、内水の誘因である。このため、洪水リスクを評価する場合には、降雨—流出—氾濫のプロセス全体を考慮する必要がある。

しかしながら、このような目的で利用しうる統合モデルツールはまだ少ない。著者らは、複数のハザードから洪水リスクを評価するために、地理情報システム(GIS)に基づいて、統合型シミュレーションモデルを開発した。このモデルは分布型流出モデルと非定型メッシュ氾濫モデルとを結合したモデルである。計算効率を改善するために、流出モデルにはkinematic wave法を、氾濫モデルにはshallow water方程式を用いたモデル化を行った。また、すべてモデルのデータはGISで管理し、体系的な処理を可能としていることも本モデルの特色の一つである。

(3) 地先の水害リスクの算定

(1) の分析によって得られた継続時間の異なる降水量の同時確率分布から、モンテカルロシミュレーションによって、多数のハイトグラフとその生起確率を与える。それぞれのハイトグラフを入力として、(2) で開発した統合型シミュレーションモデルを実行し、それぞれのハイトグラフに対応する被害の空間分布を求める。この際、それぞれのハイトグラフに対応する生起確率もわかっているから、被害の確率分布が流域内の各地先ごとに定まることになる。

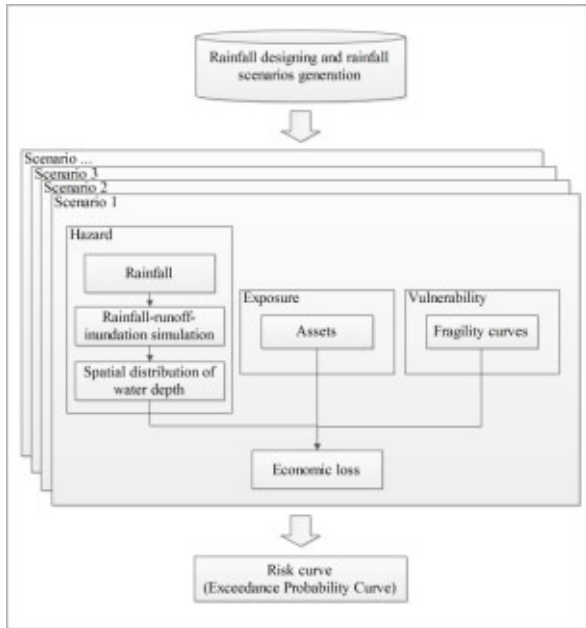


図 2 地先の水害リスク評価の流れ

3. ケーススタディー

(1) ケーススタディーエリア

ケーススタディーエリアとして、大阪府の大津川流域を取り上げる。図3に示すように大津川は大阪府南部を流れる河川であり、大阪府が管理する二級河川である。大阪府下の二級河川の水系としては最大の流域面積を持つ。主な支流は槇尾川、東槇尾川、牛滝川、松尾川、父鬼川5つである。流域面積は102.2平方キロメートルで、和泉、岸和田、および泉大津市の3市と忠岡町を含んでいる。大津川流域の上流は未開発の高い山岳地帯であり、中流部は泉北ニュータウンなどの部分的に開発の進められた流域で、下流はよく発達した都市部となっている。ケーススタディーエリアでは、年間平均気温は16°C、年間平均降水量は約1200ミリメートルである。6月中の梅雨の季節9月の台風シーズンは年間降水量一番多い月である。本研究では、大津川流域の下流を洪水リスク評価エリアとして、複数の河川からの浸水や内水氾濫等の

複数のハザードから洪水リスク、つまり、地先安全度を評価する。

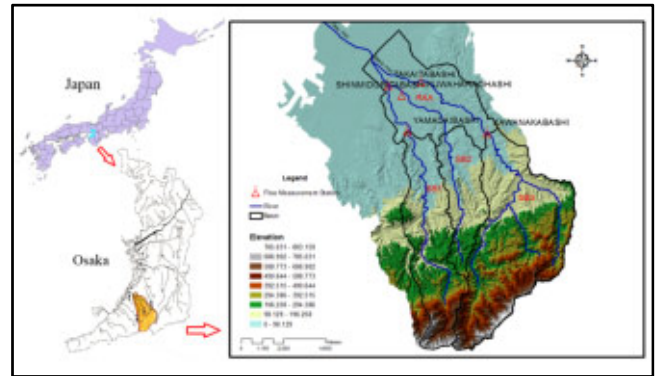


図 3 ケーススタディーエリアの位置

(2) 降雨分析と計画降雨

a) 洪水到達時間による重要な降雨期間の決定

このケーススタディーエリアは洪水災害が発生しやすいところである。1950年から2011年まで、14洪水のイベントを記録した。洪水の原因は、内水と外水両方ある。特に、三つ川の合流する下流部氾濫原は、洪水の頻度が高い。また、人口や財産などは流域の下流部に集中している。従って、このエリアは優先的にリスク評価エリアとして考慮する必要がある。リスクアセスメントエリアに着目して、図3のように、部分流域に分割した。具体的には、牛滝川流域(サブ流域1(SB1)の流出)、松尾川流域(サブ流域(SB2)の流出)、槇尾川流域(サブ流域(SB3)の流出)と内水(洪水リスク評価エリア(RAA)の流出)である。

Kraven式によると、牛滝流域の洪水到達時間は2時間で、松尾流域の洪水到達時間は1.6時間で、槇尾流域の洪水到達時間は2.7時間である。そして、リスクアセスメントエリアの内水の洪水到達時間は1時間と定義する。従って、複数のソースからの洪水の同時確率の分析するために、1時間、2時間、および3時間最大降水量を特性量として抽出し、その同時分布を求めることとする。このために、まず、観測降雨データから、流域平均雨量を求めて、各降雨イベントの最大1時間、2時間、3時間降水量を統計分析のサンプルとして抽出し、その相関構造を分析し、最も適切なコピュラを推定する。その上で、各1時間、2時間、3時間最大降水量の確率分布(周辺分布)を求め、先に求めたコピュラにより同時分布を構成することとする。

b) コピュラを用いて降雨の多次元確率分布の構成

I. 降雨相関関係分析

このケーススタディーでは、1時間、2時間、3時間降雨の相関関係を考えるので、三次元確率分布を構成することが必要となる。本研究では、pair copula construction (PCC)法を採用し、パラメーターの推定を

行った。水文学の研究によく使う 20 種類コピュラ (Archimedean copulas, extreme value copulas, meta-elliptical copulas, and other miscellaneous families of copulas などの族を含む) を候補として、赤池情報量基準 (AIC) を用いて採択するコピュラを決定した。結果として、1-2 時間の降雨量の相関関係はパラメータ 3.357 の Gumbel survival copula で表現でき、1-3 時間の降雨量の相関関係はパラメータ 0.804 の Gumbel survival copula で表現でき、2-3 時間の降雨量の相関関係はパラメータ 2.923 と 3.451 の BB7 copula で表現できる。そのコピュラの密度関数は、図 4 に示す。

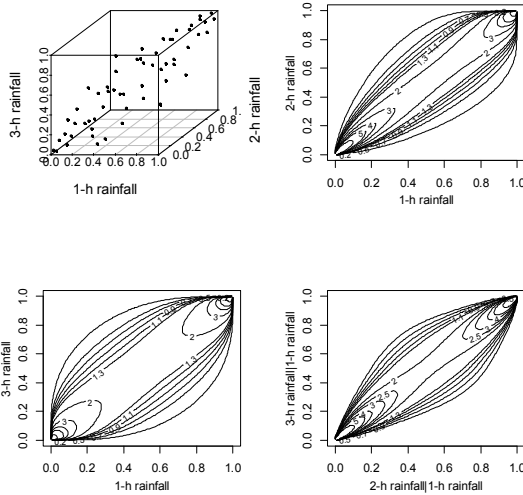


図 4 コピュラ関数の密度分布

II. 周辺分布の分析

極端な降雨の確率分布に関する多くの研究が行われた。いくつか分布タイプは、降雨量データに適用することがわかった。しかし、降雨の地域性のため、すべての降雨データに適合する分布はいない。周辺分布を決める時、実際の観測データとのフィッティングが必要である。したがって、Generalized Pareto 分布 (GP), Generalized Extreme Value 分布 (GEV), Exponential 分布 (EXP), Gamma 分布 (GM), lognormal 分布と Weibull 分布を候補として、KS テストと AIC で選択する。結果は最大 1 時間の降雨はパラメータ (3.098, 0.359) lognormal 分布である、年間最大 2 時間の降雨はパラメータ (1.76, 16.259, 10.725) の Pearson 分布である、年間最大 3 時間の降雨はパラメータ (3.672, 0.369) の lognormal 分布である。

III. 同時分布の構成

周辺分布とコピュラを決定されると、同時分布を構築することができる。Aas et al. (2009) は、多次元コピュラからのサンプリングのアルゴリズムを提案している。このアルゴリズムを利用して、ランダムコピュラ値を生成することができる。図 5 は 10000 ランダムコピュラ値

(黒点) を示す。赤点は観測値 (1 時間、2 時間、3 時間降雨量) である。この図を見ると、コピュラ方法は実際の降雨相関関係をよく表現していることがわかる。

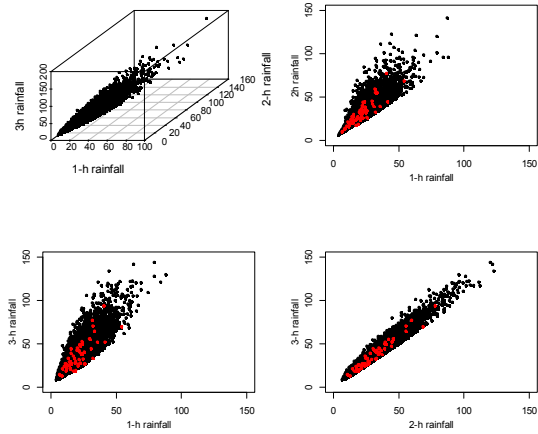


図 5 コピュラ法によるランダム降雨の生成結果

IV. 降雨強度式を用いた降雨生成方法との比較

比較的小規模な河川流域においては降雨強度式 (IDF 曲線) に基づいた計画降雨の作成が比較的好くなされている。また、地先の安全度評価に際しても、滋賀県での評価に際してはこの方法が用いられている。比較のために、同じデータで、IDF 曲線を作成する。IDF 曲線の作成は三つステップに分けて実施できる (図 6 参照)。すなわち、①各降雨継続時間内の最大降水量の確率分布を推定する。②推定した確率分布の分位数で、再現期間 T に対応する降水量を求める。③回帰分析を使って、再現期間 T の様々な雨量と降雨期間の関係を推定する。本研究では、1 時間、2 時間、3 時間最大降水量に着目するので、最後のステップを省略する。

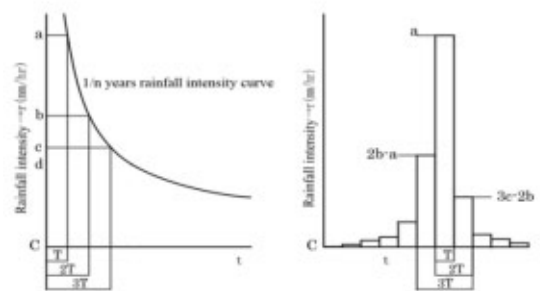


図 6 降雨強度式を用いた計画降雨の作成方法

一方、コピュラを用いて、任意の超過確率に対応する降雨を構成するためには、各特性量 (この場合は、1 時間、2 時間、3 時間最大降水量) に対応する同時超過確率を求め、図 7 のように構成すればよい。シミュレーションに際しては、前期降雨と後期降雨を追加した (図 9 の緑の部分)。図 8 にこのようにして生成されたハイエ

トグラフを示しておく。

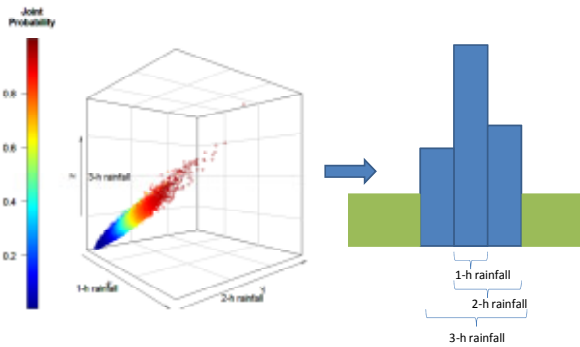


図 7 コピュラを用いた降雨パターンの作成方法

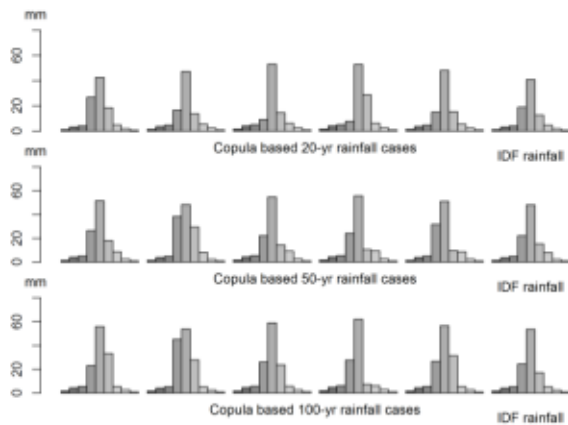


図 8 IDF 曲線計画降雨とコピュラ計画降雨の比較

図 9 は 1/10, 1/20, 1/50, 1/100 再現期間の比較である。この図から、以下の指摘することができる。① IDF 法では、一つ再現期間には一つの降水量が対応する。しかし、コピュラ法では、同時確率分布に基づくので同じ再現期間でも、複数の降雨が生成される。②同じ再現期間であっても、コピュラ法で生成した降水量は降雨強度式に基づく方法より大きくなる。すなわち、滋賀県で用いられているような降雨強度式を用いた計画降雨の構成法に基づいて地先の水害リスクを推計することは、実際の水害リスクを過小評価する可能性が高いことを示している。

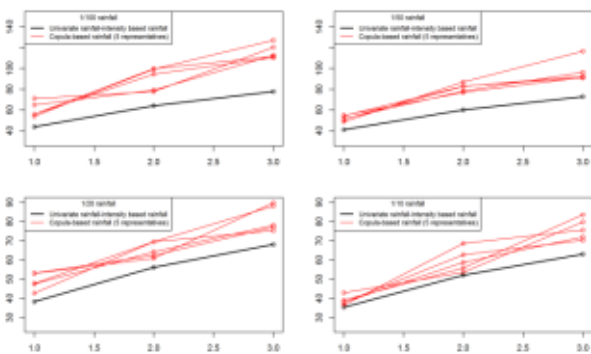


図 9 雨量強度式に基づく降雨とコピュラ降雨の比較

(3) 降雨—流出—氾濫のシミュレーション

このケーススタディーエリアは、まず、地形と人口分布によって、二つ部分に分ける。洪水リスク評価エリアは人口と財産集中の流域下流部分の氾濫原である。流出エリアは流域の上流部分である。洪水リスク評価エリアは道路と地形によって、人工で、非定型メッシュに分ける。平均面積はほぼ 50 m×50 m である。メッシュは主に四角形であるが、一部、三角形と五角形の形状も許している。流出エリアは地形によって、複数の集水区に分割した。流出モデルは kinematic wave 法で計算し、氾濫モデルは浅水方程式で計算した。

(2) の分析によって得られた継続時間の異なる降水量の同時確率分布から、モンテカルロシミュレーションによって、多数のハイトグラフとその生起確率を与える。それぞれのハイトグラフを入力として、統合型シミュレーションモデルを実行する。図 10 はシミュレーション結果の一例である。

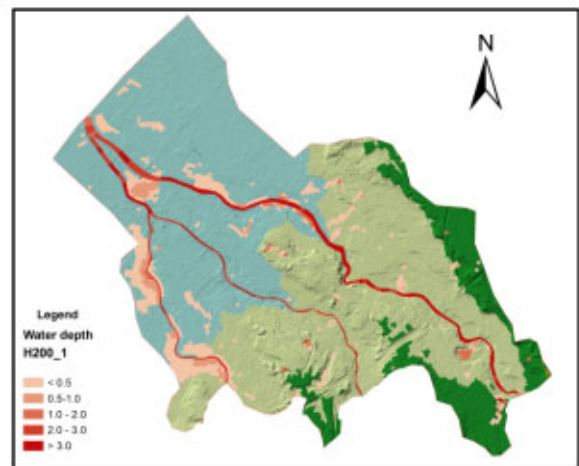


図 10 氾濫シミュレーション結果の例

3.4 地先の水害リスク評価

水害リスク評価のために、人口と財産の空間分布の情報を GIS 上に格納し、治水経済調査マニュアルに記載された方法に基づいて、メッシュごとの浸水深から被害額を算出する。

それぞれのハイトグラフに対応するハザード、暴露資産分布や脆弱性を組み合わせて、リスクを推定することができる。(Tatano 2005) ハザードと暴露資産分布は空間分布しているの、リスクの空間分布を求めることができる、つまり、各メッシュに、水害に対する損失確率分布を求めることができる。メッシュ 6881 を例として、イベント曲線、リスク曲線を図 11 に示す。黒い点は各計画降雨による損失である。超過確率の等しい複数の降雨パターンに対して、その損失の分布が分かる。点線

は平均損失によるイベントカーブである。赤い線は二次不確実性を含めるリスクカーブである。比較のために、IDF 計画降雨によるイベントカーブも黒い線で示す。

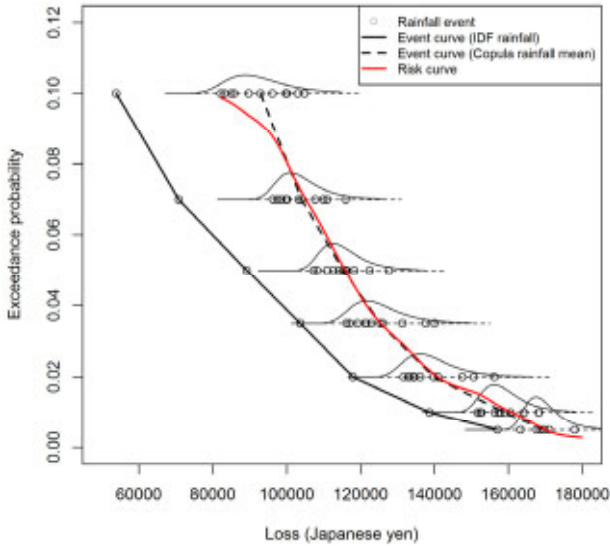


図 11 メッシュ 6881 のイベント曲線、リスク曲線

図 15 は流域内の任意の地点における水害リスクを示す。この図は、洪水防御や雨水排除施設の設計に際して用いられてきた洪水リスク解析を、土地利用の誘導や建築規制、避難場所や避難ルート確保等の様々な対策を含む統合的洪水リスク管理などの政策分析を行う際には大変有用なツールとなるであろう。

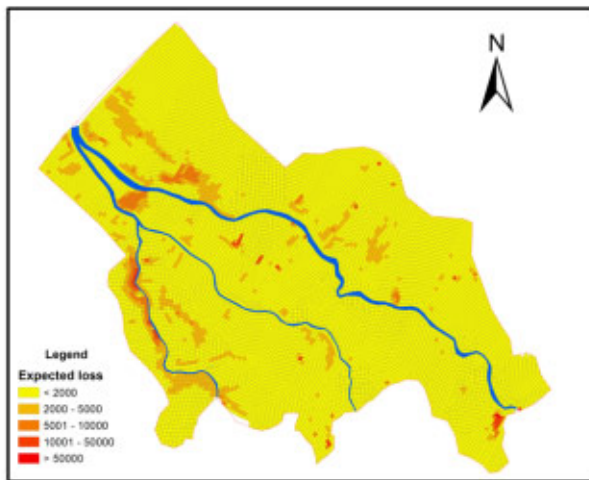


図 12 期待損失による洪水リスクの空間分布

4. まとめ

この研究は、複数の河川からの浸水や内水氾濫等の複数のハザードを考慮した新しい洪水リスク評価方法を開発した。本研究で得られた成果は以下のようである。

- ① 複数の河川や内水氾濫のリスクを統合的に取り扱うことを可能とする地先の水害リスクの算定のための方法論の提示
- ② 継続時間の異なる最大降水量の同時分布の推定法の開発
- ③ GIS に基づく統合型の降雨—流出—氾濫モデルの開発
- ④ 大阪府の大津川流域を例として、この方法の適用可能性を示した
- ⑤ 降雨強度式から構成されるハイエトグラフに基づいた評価方法が地先の水害リスクを過小評価する可能性を示した

この方法は、降雨の空間分布を考慮していない。このため、空間分布が均質であるとみなしても差し支えない中小流域には適用することができる。しかしながら、大河川流域では、空間分布を無視することは地先の水害リスクを過大評価することにつながりかねないことから、今後、この点に関する改善を検討していく予定である。この点は、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Aas, K. and Berg, D.: Models for construction of multivariate dependence—a comparison study. *Eur J Financ*, 15(7–8), 639–659, 2009.
- 2) Genest, C. and Favre, A. C.: Everything You Always Wanted to Know about Copula Modeling but Were Afraid to Ask. *J Hydrol Eng*, 12(4), 347–366, 2007.
- 3) Ghosh, S.: Modeling Bivariate Rainfall Distribution and Generating Bivariate Correlated Rainfall Data in Neighbouring Meteorological Subdivisions Using Copula. *Hydrol Process*, 24, 3558–3567, 2010.
- 4) Jiang, X., Tatano, H., and Tomoharu, H.: A Methodology for Spatial Flood Risk Assessment Taking Account of Spatial–Temporal Characteristics of Rainfall. *J Integr Risk Man*, 3(1), 75–91, 2013.
- 5) Nelsen, R.: *An Introduction to Copulas*, Second edition, Springer, New York, 2006.
- 6) Salvadori, G. and De Michele, C.: *Frequency Analysis Via Copulas: Theoretical Aspects and Applications to Hydrological Events*. *Water Resour Res*, 40, W12511, 2004.
- 7) Serinaldi, F.: A multisite daily rainfall generator driven by bivariate copula-based mixed distributions. *J Geophys Res-Atmos* (1984–2012), 114(D10), 2009.
- 8) 多々納裕一・高木朗義(編著): *防災の経済分析*, 勁草書房, 2005.