

## 水害のリスクとその不確実性について

下川信也\*・高尾堅司\*・竹内裕希子\*・佐藤照子\*・福園輝旗\*

### Flood Risk and its Uncertainty

Shinya SHIMOKAWA, Kenji TAKAO, Yukiko TAKEUCHI, Teruko SATO, and Teruki FUKUZONO

*Disaster Prevention Research Group,*

*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

*simokawa@bosai.go.jp, takao@bosai.go.jp, takeuchi@bosai.go.jp, sato.sun@bosai.go.jp, fukuzono@bosai.go.jp*

#### Abstract

In general, the results related to flood risks such as hazard map is considered to be certain. All this kind of the results, however, is not always certain though it is calculated by a reliable method or standard. In fact, there are many uncertain factors in deciding flood risks. We discussed, in particular among them, uncertainty arisen in calculation process of stochastic precipitation which is the basis of planning for measures of flood control. The most important thing in considering the results related to flood risks is to judge our own risk and choice an appropriate action on the knowledge of that they include various kind of uncertainty.

**Key words** : Flood, Risk, Uncertainty, Probability, Stochastic precipitation

#### 1. はじめに

この小論では、水害リスクを決める過程にはどのような不確実性が存在するのか、水害リスクに関わる結果を評価するときにはどのような点が重要なのか、について議論する。

一般には、ハザードマップなどの水害リスクに関わる結果は、確実なものと考えられていることが多い。しかし、この種のどのような結果も、ある程度信頼を得た手法や基準のもとに計算されたものではあるが、決して確実なものではない。以下では、水害リスクを決める過程における不確実性の要因や、その不確実性を考慮したリスク評価の考え方を、我々が現在特定プロジェクト「災害に強い社会システムに関する実証的研究」において開発中の参加型水害リスクコミュニケーション支援システム（Participatory Flood Risk Communication Support System: Pafrics）での取り扱いを含めて述べる。

#### 2. 洪水現象の物理プロセス

洪水現象は、通常、①入力としての降雨、②流出過程、③氾濫過程、④出力としての水位の4つのプロセスに分けて考えられる（図1）。以下それぞれの内容について説

明する。

##### ① 入力としての降雨

まず、なんらかの原因で雨が降る（洪水現象においては、降雨は完全に外力として扱われる。その降雨の規模は、後で述べる水文統計により推定される）。

##### ② 流出過程

降った雨はすべてが地表に流出してくるわけではなく、樹木によって遮断されたり、地中に浸透したりして、その一部のみが地表に流出してくる。地中に浸透した雨もあるタイムラグをもって地表に流出してくる。すなわち、ある瞬間の降雨量と流出量は異なるものとなる。従って、降った雨のうちどの程度の量が流出してくるかをその場所の地表面や土壌の特性に応じて解析する必要がある。

##### ③ 氾濫過程

流出した雨は河川や道路などに流れ込んでゆく。流出経路は標高や建物などの障害物によって左右される。河川が氾濫する場合、その場所は河川の流量や形態、堤防の強さなどによって左右される。従って、流出した雨がどこに集まってゆくのか、その結果どこで氾濫するのかを解析する必要がある。

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 総合防災研究部門

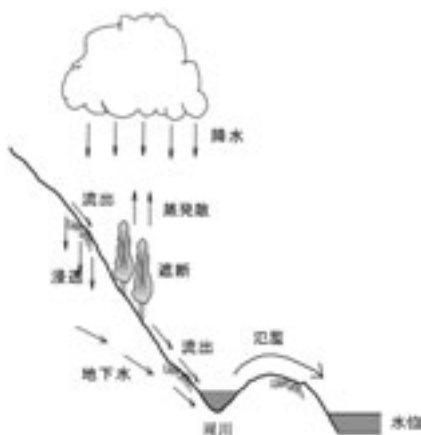


図 1 洪水に関わる物理プロセス

Fig. 1 Physical process related to flooding.

#### ④ 出力としての水位

ある場所で氾濫した水は、ほかの地域に流れ込んだり、その地域の排水設備により下水路等に排出されたりする。最終的に氾濫した場所の周辺域での水位の分布とその時間変化が求められる。水害の大きさを決めるのは、最大浸水深である。

### 3. 水害のリスクを決める重要な要因

この水害のリスクを決める重要な要因には、次のようなものがある (National Research Council, 2000)。

- ・ 水文学的要因
- ・ 水理学的要因
- ・ 構造的地盤工学的要因
- ・ 材料的建設的要因
- ・ 地震学的要因
- ・ その他の地球物理学的要因
- ・ 操作的維持的要因

水文学的要因とは、降雨データ、洪水データ、流域-水路データなどである。水理学的要因とは、洪水伝播の性質、及び、それをシミュレートするための方程式や方法などである。構造的地盤工学的要因とは、地盤や土壌の地理的、及び、地質的性質などである。材料的建設的要因とは、ダムや堤防などの構造物の材料や建設方法などである。地震学的要因とは、地震によるダムや堤防など構造物の破壊、及び、地盤の液状化などである。その他の地球物理学的要因とは、ダムや川の中の氷の運動、及び、雷、竜巻などである。操作的維持的要因とは、緊急時のダムなどの操作対応手順、及び、河川系の維持管理などである。

### 4. 不確実性の伝播とその取り扱いの現状

これらの水害のリスクを決める要因は相互に関係しているため、ひとつの要因で不確実性があれば、そのほかの要因のモデルが完璧であったとしても、その不確実性が伝播してゆくことにより、より大きな不確実性が生まれてしまう。例えば、前節で述べたように、水害に関する諸量の計算は、降雨をもとに、流出、氾濫水位、被害

の順に求められるが、最初の降雨に誤差が存在するとその後の各プロセスで誤差が積算されることにより、徐々に誤差が大きくなってしまふ。このような不確実性を適切に取り扱うことは現在の知識レベルでは非常に難しい。水文・水理の要因のみにはそれらの不確実性を取り上げたモデルが使われつつあるが、それらも完全なものではない (例えば, Bolgov *et al.*, 1998)。

防災計画などでの大きな問題は、水害のリスクの推定にはこういった多くの不確実性が存在することが、一般の住民にはあまり認識されていないということである。次節では、そのような不確実性が存在するという事実を、防災計画策定の基礎となる水文統計 (確率降雨) を例として、具体的に説明する。

### 5. 水文統計の手法

水文統計とは、起こりうる降雨の大きさを過去の降雨データから推定する手法のことである。例えば、100年に一度起こりうる程度の大きさの降雨 (100年確率降雨) を過去の降雨データから求める。これは水害対策の計画策定の基礎となる。例えば、一級河川では、その地域の100年あるいは200年確率降雨に耐えうるように堤防などを補強することになっている。

その水文統計における不確実性の要因を明らかにするために、その計算方法について具体的にみてみよう。確率降雨の大きさは、①解析データの抽出→②適用分布形の選定→③異常値の棄却に関する検討→④確率水文学および確率年の推定の手順のもとに決定される (社団法人日本河川協会編, 1997)。以下にそれぞれの内容について説明する。

#### ① 解析データの抽出

データは、同一条件下で得られたこと、その値の間に関連性がないこと、その数はできるだけ大きいことなどの条件のもとに抽出を行なう。ただし、年最大値データを抽出する場合、解析の目的に応じて対象の季節を限定して (例えば、洪水期に限定して)、抽出することが望ましい場合もある。

#### ② 適用分布形の選定

適用分布形には、対数正規分布、グンベル分布、対数極値分布 A 型、ピアソン III 型分布、対数ピアソン III 型分布、指数分布などがある。適用分布形の選定の目安として、対数正規分布は、月・年などの比較的長期の毎年極値データの分布に、グンベル分布、対数極値分布 A 型、ピアソン III 型分布、対数ピアソン III 型分布は、日・時間などの比較的短期の毎年極値データの分布に、指数分布は、非毎年データの分布、全数データまたは最大または最小側の部分データの分布によく適合することが知られている。米国では、洪水の頻度解析の基準法として対数ピアソン III 型が推奨されている。分布関数の適合度は原則として確率紙上で目視により行なう。データを大きさの順に並べ、データを確率紙にプロットする。もしそのデータがその確率紙の確率分布に従うならば、それらの点は一直線上に並ぶ。データのプロット位置を与える方法として

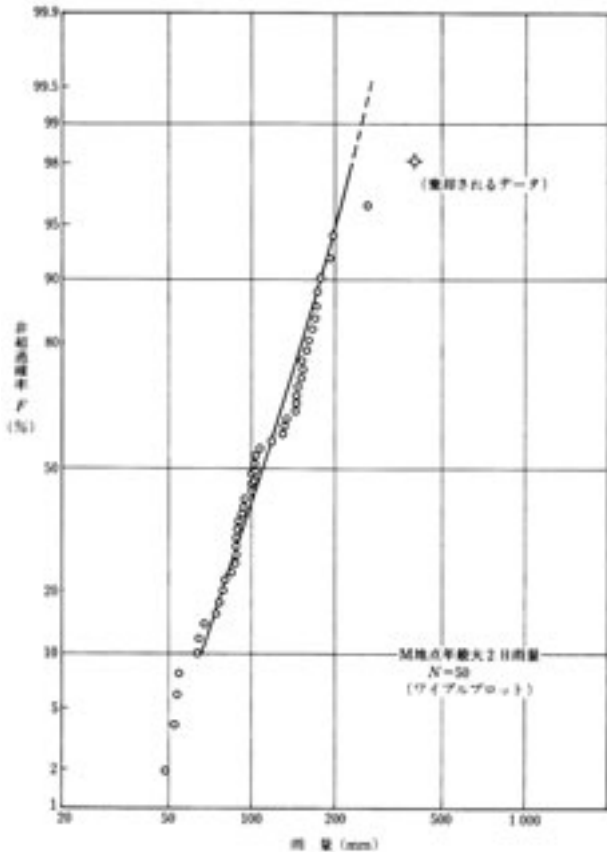


図2 確率降雨の推定の具体例（建設省河川砂防技術基準（案）同解説より）。横軸は雨量（mm）。縦軸は非超過確率（%）。例えば、99%は1/100（=1%）確率降雨を表す。

Fig. 2 An example of estimation of stochastic precipitation. Horizontal axis shows rain fall (mm). Vertical axis shows non-excess probability. For example, 99% represents 1/100 (=1%) stochastic precipitation.

は、ワイブルプロット ( $i/(N+1)$ ,  $N$ は総データ数,  $i$ はデータの順位) またはヘイズンプロット ( $(2i-1)/2N$ ) がある。ワイブルプロットは各データ値の位置の期待値を与える。ヘイズンプロットは各データ値を代表する各区間の中央値と考えることに相当する。ワイブルプロットの方が合理的であるが、ヘイズンプロットの方が適合性がよいとも言われる。ワイブルプロットはヘイズンプロットよりも大きめの水水量を与えるので水防計画上の観点からは安全側の値を与える。

③ 異常値の棄却に関する検討

データの中に異常な値がある場合は、必要に応じてデータの棄却に関する検定を行なう。しかし、データの棄却検定はあくまで確率計算上の取り扱いであって、これによって棄却されるデータであっても計画策定などに際して重要な意味をもつ場合には、その取り扱いは別途考慮する必要がある。

④ 確率水水量および確率年の推定

確率水水量および確率年は次のように推定される。例えば、ある地域の年最大雨量のデータが10年分あるとする。

これを大きい順に並べ替える ( $D_i$  ( $i=1,10$ ),  $i$ はデータの順位)。確率紙の横軸にはこの値がプロットされる。確率紙の縦軸の値には、推定された確率年がプロットされる。例えば、ワイブルプロットならば、一番小さいデータは、1.1年に一度 ( $10/11=1/1.1$ ) の確率で起こると推定される。一番大きいデータは、11年に一度 ( $1/11$ ) の確率で起こると推定される。これらのデータが直線上にのるならば、その確率紙の確率分布が妥当とされる。この直線上の縦軸が1/100のところの横軸の値をみれば、100年に一度の確率で起こる降雨量が推定される。もしこれらの10年分のデータの中に100年に一度の確率で起こる降雨が含まれていたとしても、それは上の方法では最大で11年に一度の確率で起こるとしか推定されないが、その点は直線にはのらないはずである。その意味で、そのデータの異常性が確認できる (図2)。

6. 水文統計の不確実性

前節で述べた手順からわかるように、水文統計には、次のような不確実性があると考えられる。

- ① 確率そのものの不確実性
- ② データそのものの不確実性
- ③ 有限個のデータからの推定による不確実性
- ④ 確率の推定手法の差異による不確実性
- ⑤ 気候変動による不確実性

以下にそれぞれの内容について説明する。

① 確率そのものの不確実性

確率そのものの不確実性とは、例えば、確率が1/100年の降雨だからといって100年に一度しか降らないとは限らないということである。100年確率降雨がある年に降ったとしても次の年に降らないとは限らない。2年連続100年確率降雨が降ることもありえる。確率そのものには以上の意味での不確実性が存在する。しかし、このことは一般には誤解されていることが多い (この項については7節及び8節で再び言及する)。

② データそのものの不確実性

確率を推定するためのもとのデータは必ず誤差を含んでいる。過去のデータになればなるほど誤差の大きいデータは多くなる。それらの誤差のあるデータから確率降雨を推定するので、その推定値には不確実性が存在する。

③ 有限個のデータからの推定による不確実性

過去の降雨データはそれほど多くあるわけではない。特に100年以上前の降雨データはそれほどたくさんあるわけではない。それらの少数のデータから確率降雨を推定するので、その推定値には不確実性が存在する。

④ 確率の推定手法の差異による不確実性

確率の推定手法にはさまざまなものがある。前節で述べたように、月や年などの比較的長期の毎年極値データには対数正規分布、日や時間などの比較的短期の毎年極値データには極値分布、非毎年データには指数分布などがよいとされている。しかし、その選択には、このようなある程度の基準はあるものの、基本的には任意である。どの手法を選択しようと、それが (数学的に) 間違いで

表 1 東海豪雨の確率年の推定の例

Table 1 Examples of estimation of stochastic year for Tokai heavy rainfall.

河田 (2002)	少なくとも 200 年に 1 回
水谷 (2002)	少なくとも 1000 年に 1 回
牛山と寶 (2002)	40137 年に 1 回

あるということはない。しかし、実際には、どの手法を選択するかによって、結果は大きく異なる。特に信頼度の低い領域（例えば、100 年確率降雨のような確率の低い降雨）においてはそのことが顕著になる。確率降雨の推定には、以上の意味での不確実性が存在する。

⑤ 気候変動による不確実性

過去の降水量からある確率の降水量を推定するという事は、過去の気候も未来の気候も一定であるということ仮定している。しかし、実際には気候は変動している。そのことにより雨の降り方も異なってくる。実際、冷夏や暖冬などの自然変動があることはよく知られている通りである。また、最近では、CO<sub>2</sub>による温暖化などの人工変動も問題になっている。確率降雨の推定には、以上の意味での不確実性が存在する。

次に具体例を少し見てみよう。例えば、2000 年に起こった東海豪雨の場合（2000 年 9 月 11 日、日雨量 428mm、最大時間雨量 97mm）、その確率は約 200 年に一度から約 40000 年に一度まで研究者によって推定にかなり差がある（表 1）。これらの差は主にデータの期間（個数）と確率の推定手法による差である。

7. 降雨の確率の特殊性

降雨の確率には、通常確率、例えば、サイコロの確率などとは少し異なる側面がある。サイコロの確率は、過去においても現在においても未来においても、どの目がでる確率も 1/6 であるが、降雨の確率は必ずしもそうではない。例えば、ある年に過去の降雨量から推定して、ある量の降雨の確率が 1/100 であったとしよう。もしその後 10 年間にその量以上の降雨が複数回起こったとしたら、10 年後において、その量の降雨はもはや 1/100 の確率ではない（1/100 より高い確率の降雨になる）。このことは、6 節で述べた気候変動による不確実性と関連する。つまり、気候変動により雨の降り方そのものが変わってしまえば、過去の降雨量から未来にある量の降雨が起こる確率が推定できるという保証はないのである。しかし、そもそも、気候変動がなくても、過去の降雨から（メカニズムを考えずに）今年ある量の降雨が起こる確率を計算できるということは、当たり前なことではなくてある仮定なのである。問題は、どのように仮定すべきか、ということである。ここでは詳しくは触れないが、このことは統計学におけるベイズの定理の事前確率の考え方と密接な関連がある（ベイズの定理については、例えば、東京大学教養

部統計学教室（1992）を参照。その確率的な予測との関連については、例えば、片山、1975、松村、2004 に、地震予知との関連における興味深い考察がある）。

また、いわゆる予測不可能性には不確実性と変動性のふたつの要因がある（Vose, 2003）。不確実性とは、その対象に対する我々の知識不足のことである。一方、変動性とは、その対象そのものが持っている偶発的あるいは確率的な作用のことである。一般には、この両者が混在して予測不可能性を示すことが多い。確率降雨の例では、データそのものの不確実性、有限個のデータから確率を推定することによる不確実性、確率の推定手法の差異による不確実性は、いわゆる「不確実性」であるが、確率そのものの不確実性と気候変動による不確実性は、「変動性」と考えるべきものであろう。しかし、「気候変動」が予測できないこと自身は、我々の知識不足による「不確実性」でもありうる。サイコロの確率と降雨の確率ではこのような側面でも異なるところがある。

8. Pafrics における不確実性の取り扱い

水害リスクの不確実性における最も大きな問題点は、さまざまに提供される水害に関する予測の中には実際には確率的なものも存在するにもかかわらず、それらが絶対に確実なものと思えられがちなことである。例えば、先に述べたように、100 年確率降雨といっても、100 年に一度しか降らないわけではなく、場合によっては短期間に複数回起こることもありえるのである。<sup>注 1</sup> それゆえに水害は一度起こったからしばらくは安心というわけではなく、日頃の備えが重要となるわけである。

現在開発中の参加型リスクコミュニケーション支援システム（Pafrics）では、これらのことを含め、水害に関わる予測には、多くの不確実性が存在するという事を理解してもらうためのさまざまな工夫を、特に、確率そのものの考え方とそれに基づくリスクの評価の仕方に焦点を当てて、行なっている。例えば、確率そのものの考え方をよりよく理解してもらうための工夫のひとつとして、次のようなサイコロゲームによる説明などを試みている。前節で述べたように、厳密に言えば、降雨の確率とサイコロの確率には異なる側面もあるが、このような水害リスクの不確実性を感覚的に理解する上では、サイコロの確率を例にとることはわかりやすいであろう。

図 3 は、回数を設定してボタンを押すと、その回数だけコンピュータ上で乱数を発生させることによりサイコロがランダムに変化するというゲームである。同じ数が 3 回以上連続したときには色が変わって表示される。サイコロはどの目が出る確率も 1/6 であるが、同じ目は 6 回に 1 回しか出ないのではなくて 2 回以上連続して出ることありえる。そのことを、具体的にゲームを通して示すことにより、確率そのものの不確実性を感覚的に理解してもらうことを目的としている。

また、このような確率の考え方を使うと、水害リスク

注 1: 例えば、100 年確率降雨が、次の 30 年間に一度以上起きる確率は、約 26 %  $(1-(99/100)^{30} = 0.26)$  と意外に大きい。



図3 Pafricsにおけるサイコロゲーム

Fig. 3 Dice game in Pafrics.

という漠然としたものを次のように数量的に表すことができる。

リスクの大きさ

= (そのリスクの起こる確率)

× (そのリスクが起こったときの被害)

ここで重要なことは、リスクが、漠然としたムードや抽象的な言葉ではなく、そのリスクの発生する確率と被害の大きさの双方から数量的に表すことができること、そして、そのリスクの大きさを知り、そのリスクに対して適切に対処することで、被害を軽減することができることである。しかし、同時にその確率や被害の大きさには多くの不確実性が含まれていることの認識も重要である。

特に、被害の大きさの推定には、何をどこまで被害と考えるかということや、リスクを評価する主体（組織や個人）の価値判断や心理的要因を考慮する必要がある。つまり、個人や組織がリスクを評価するという自身においても多くの不確実性が存在する。例えば、長年大規模な水害に悩まされてきた地域の住民は、行政機関に河川整備、河口堰、防潮堤などの建設を要求するのは、当然かもしれない。しかし、最近では、自然環境を保護する動きも盛んになっていて、河川整備などに対して反対の声があることも少なくない。前者は「水害が起こる」というリスクを、後者は「環境が破壊される」というリスクを扱っており、実は着目するリスクが異なることがわかる。立場や利害や価値観などが異なれば、そもそも着目するリスクが異なるということである。また、同じリスクに

着目していたとしても、立場などによって受け入れられるリスクの大きさは異なるということもある。

## 9. まとめと展望

水害リスクを決める際には、多くの不確実な要因が存在する。また、その水害リスクの評価には、立場や利害や価値観などが異なれば、着目するリスクがそもそも異なるといった問題も存在する。大事なことは、それらを踏まえたうえで、水害リスクを自分自身が判断し適切な行動を選択することである。

我々は、これらのことをわかりやすく理解するための材料を提供することを目的として、参加型リスクコミュニケーション支援システム(Pafrics)を開発中である。現在、地方自治体、NPOや大学などでの活用を通してその有効性を確認するとともに、より効果的なシステムとなるよう改良を加えている。

## 参考文献

- 1) Bolgov, L. M., L. Gottschalk, I. Krasovskaia and R. J. Moore eds. (1998) : Hydrological Models for Environmental Management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 2) 片山恒雄 (1975) : 地震活動度・危険度の確率論的な考え方. 生産研究, 27, 185-195.
- 3) 河田恵昭 (2002) : 2000年東海豪雨とその災害. 自然災害科学, 21, 8-14.
- 4) 建設省河川局監修, 社団法人日本河川協会編 (1997) : 改訂新版建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説・調査編, 山海堂.
- 5) 東京大学教養部統計学教室 (1992) : 自然科学の統計学. 東京大学出版会.
- 6) 松村正三 (2001) : 少数の事例から地震発生率を評価する際の問題について. 地震, 54, 45-46.
- 7) 水谷武司 (2002) : 自然災害と防災の科学. 東京大学出版会, 東京.
- 8) National Research Council (2000) : Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies, National Academic Press, Washington, D.C.
- 9) 牛山素行, 寶馨 (2002) : 1901年以降の豪雨記録から見た2000年東海豪雨の特徴. 自然災害科学, 21, 145-159.
- 10) Vose, D. (2000) : Risk Analysis: A Quantitative Guide 2nd Edition. John Wiley & Sons, England.

(原稿受理: 2004年9月30日)

## 要 旨

一般には、ハザードマップなどの水害リスクに関わる結果は、確実なものと考えられていることが多い。しかし、この種のような結果も、ある程度信頼を得た手法や基準のもとに計算されたものではあるが、決して確実なものではない。実際、水害リスクを決める際には、多くの不確実な要因が存在する。この小論では、それらの要因の中でも、特に、水害対策の計画策定の基礎となる確率降雨の算出過程に生じる不確実性について議論する。水害リスクに関わる結果を評価するときに重要なことは、それらの結果には不確実性が存在するということを踏まえたうえで、それぞれのひとが自分自身のリスクの判断し適切な行動を選択するということである。

キーワード：水害，リスク，不確実性，確率，確率降雨