

## 集中豪雨による被害発生予測と防災予算指標の原型

Estimating frequency, severity of heavy rainfall disaster and prototypic budget indices for prevention

安野貴人\*

Takato Yasuno

\*博 (工) 株式会社ニュージェック, 社会計画グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1 丁目 12-13)

In recent years, being global warming, some events of extreme weather have occurred frequently. Among those events, the heavy rainfall generates locally and it becomes serious damages since the prior prediction is not easy. In Japan at “August 2008 and July 2010 heavy rain” a lot of casualties and flood damages occurred. In order to obtain disaster teachings of these severe rains, it is important to predict damage generating of local severe rain and the amount of damage which may happen based on the disaster statistics recorded in the past. Moreover, the economic amount of damage which converts the amount of predicted monetary unit provides as a standard of a future disaster prevention investment or a measure fund. This paper models both the generating frequency of the local heavy rain and the amount of severity of the damage which may happen there in order to predict them systematically. In order to prepare for generating future local heavy rains, it proposes the prototype of the disaster prevention budget index which converted the damage predicted value into the monetary unit. Actually it applies to the 1343 points of domestic 25 prefectures where heavy rain were recorded from 1971 to 1990 and it shows the estimated results and indices computed. It mentions the usefulness of this model and future developments.

*Key Words: Heavy rainfall, Frequency-severity model, Disaster budget index.*

キーワード: 集中豪雨, 発生頻度・被害量モデル, 防災予算指標

### 1. はじめに

2007 年, 世界の政府間で地球温暖化は疑う余地がない報告が採択された. 世界の過去 100 年の地上の平均気温上昇は 0.74°C と言われる. 我が国では 1980 年代後半以降, 異常高温の出現数が増え, 1990 年代以降は過去 100 年にはなかった頻度で増加している. また, 異常な雨も, 1980 年代後半頃から, 異常多雨と異常小雨ともに増えている. 特に, 2008 年「平成 20 年 8 月末豪雨」の降り方は典型的で, 各地で局地的な大雨が再三降った. これらの集中豪雨は局所的に発生し, 事前の予測と発生直前の備えが困難であることから被害も甚大となる. 最近では, 平成 22 年 7 月に梅雨前線が西日本に停滞し, 観測史上の値を上回る集中豪雨を経験し, 多くの死傷者や浸水被害が発生したことは記憶に新しい.

従来の治水経済調査では, 河川流域を氾濫ブロックに分割し, 最大被害を生じる破堤地点を想定し, 一定の確率で洪水を発生させて被害を想定する. この氾濫解析の結果は, 洪水規模と破堤地点の前提条件に依存する. 近年, 顕在化している集中豪雨の規模がこれまで想定してきた条件を超過する異常気象が起こっても不思議でない状況にある. 気象庁は, ある地点・時季に 30 年に 1 回以下の頻度で起こる現象を「異常」と定義している. また, 平成 18 年度から極端な現象の発生頻度や長期傾向に関

する「異常気象リスクマップ」を提供した. この確率降水量を用いて異常気象に伴う氾濫解析により被害を想定できるが, 各地点の実施には多大なデータ整備と労力を要する. 異常気象でどの程度の被害が発生するかは, 想定計算のみでは被害のリアリティや切迫感に欠けてくる.

近年の集中豪雨の災害教訓を得るためには, 直近に記録された気象災害統計に基づいて, 集中豪雨の被害発生確率とそこで起こりうる被害量を予測することが重要な課題である. 過去の集中豪雨の発生履歴と災害統計から被害の教訓を読みとり, 今後の集中豪雨に備えて防災対策を講じる必要がある. いつ起こるか不確定な異常気象に備え, その防災予算が十分に確保されるとは限らない. 集中豪雨の対策にどの程度の防災予算を投入し, 対策資金を準備するかを目安を把握する必要がある. そのためには, 集中豪雨の発生頻度を推定し, 今後一定期間内に起こりうる豪雨被害量を予測することが課題となる. 被害量を金銭単位に換算した経済被害額は, 防災投資の必要性や減災効果の見込みを明らかにする. 過去に記録された集中豪雨の発生傾向とそこで発生した災害履歴を教訓に, 集中豪雨に備える防災予算の指標が求められる.

本稿では, 気象災害の履歴統計を用いて, 集中豪雨の発生頻度に応じて起こりうる被害量をヒストリカルに予測する統計手法を提案する. あわせて, 一定頻度の集中豪雨に備える防災予算指標の原型を導出する. 2. で, 地球温暖化に伴う集中

豪雨の増加傾向と平成 20 年 8 月末豪雨の被害を整理し、豪雨に備える防災予算の課題に言及する。3.で、集中豪雨の被害の発生頻度と、起こりうる被害量を分解し統一的に予測するため、集中豪雨の頻度・被害量モデルを提案する。今後の集中豪雨に備え、被害予測値を金銭換算した防災予算指標の原型を提案する。4.で、実際に、本モデルを大雨・強雨が記録された地点に応用した結果を示す。5.で、本モデルの有用性と今後の課題に言及する。

## 2. 集中豪雨の被害と防災予算

### 2.1 地球温暖化と集中豪雨の増加傾向

2007 年に気候変動に関する政府間パネル（以下、IPCC 報告という）<sup>1)</sup> は、「地球温暖化は疑う余地がない」という報告書を採択し、このまま温室効果ガスを排出し続けると回復不能な影響により人類の生存が脅かされると警告した。IPCC 報告によると、世界の地上平均気温の過去 100 年の気温上昇率は 0.74℃である。日本では、東京の気温上昇率が 2.38℃で、秩父では 0.88℃である。東京のような都市部はヒートアイランドの影響を受ける。IPCC 報告の算出には、その影響のほとんどない地点の観測値が用いられており、世界各地で温暖化が進行している。日本でも、1980 年代後半から気候の温暖化が顕著となっている。異常多雨と異常小雨ともに増える傾向にある。日降水量 100mm 以上の集中豪雨の発生日数は、1980 年代後半から増えている<sup>2)</sup>。

異常気象には、1) 集中豪雨や竜巻など激しい気象現象、低気圧が極端に発達し台風や豪雨をもたらす異常気象（急激発達型）、2) 同じ気圧配置が長く続いた熱波・寒波、さらに何個も台風がほぼ同じコースで襲来する異常気象（長期継続型）の 2 種類に分かれる。IPCC 報告では、異常気象を「極端な事象」と呼んでいる。気象庁の定義では、異常気象とは 30 年に 1 回以下の平常的に現れない気象現象（高温・低温、豪雨・渇水など）を表す。過去 30 年において、集中豪雨の一つの指標となる 1 時間降水量 80mm 以上の発生回数は増えている<sup>2)</sup>。1976 年から 11 年ごとの平均値をみると、9.9 回、11.5 回、18.5 回と増加傾向にある。過去 30 年の資料に基づく、我が国では集中豪雨が増加する傾向にあることが認められる。このような集中豪雨によって国内各地で多くの被害発生が顕著となってきている。

### 2.2 平成 20 年の集中豪雨と被害

2008 年 7 月には集中豪雨が頻発し、大きな被害が発生した<sup>3)</sup>。例えば、7 月 28 日に北陸や近畿地方の広い範囲で、記録的な激しい雨が短時間に降った。神戸市内を流れる都賀川が 10 分間で 1.3m 増水し、川遊びに来ていた学童など 11 人が流され、子供 3 人を含む 5 人が死亡した。さらに、2008 年 8 月 5 日に、東京都下水道局の豊島出張所の地上雨量計で、12 時 15 分までの 30 分間に 37mm の豪雨を記録し、12 時 35 分から再び強まり 20 分間に時間

最大雨量 57.5mm を観測した。文京区雑司ヶ谷の下水道工事現場で、集中豪雨による異常出水により作業員 6 人が瞬時に流され、作業員 5 人が死亡した。この他、山梨県大月市で 8 月 4 日 19 時 20 分までの 1 時間に観測史上 1 位の 79.0mm の雷を伴う豪雨が降り、山梨県のほぼ全域が停電した。8 月 6 日には、関東北部や近畿地方で大雨となり、大阪府枚方市では 6 日 17 時 40 分まで 1 時間に観測史上 1 位の 71.5mm の豪雨が観測された。

8 月末は「平成 20 年 8 月末豪雨」と命名されたように、各地で集中豪雨が降り、被害が多発した<sup>3)</sup>。8 月 29 日に、愛知県岡崎市で 1 時間雨量 146.5 ミリの豪雨が降り、我が国の観測史上 1 位を更新した。全国 20 箇所でも各地点の 1 時間雨量の記録を更新した。狭い範囲に集中的に雨が降ったことも特徴であった。30k m<sup>2</sup>の地域内の岡崎市美合町で 447.5mm、蒲郡市神ノ郷で 365.0mm、豊橋市神野新田町で 351.0mm の総降水量が観測された。岡崎市では、死者・行方不明者 3 名、住家損壊 23 棟、住家浸水 9,579 棟、農業被害 16 億円の被害が発生した。名古屋市でも住家浸水 9,209 棟の被害を受けた。関東地方でも、千葉・埼玉を中心に住家 2,600 棟が浸水した。平成 20 年 8 月末の集中豪雨では、国内の広い範囲で豪雨が発生していることに加え、狭い範囲で局所的に激しい豪雨が観測されて、それに伴い多くの被害を発生させている。

### 2.3 集中豪雨対策のための防災予算

気象庁では、大雨の発生頻度等の空間的・時間的な情報の要望に応えるため、全国各地における極端な現象の発生頻度や長期変化傾向に関する「異常気象リスクマップ」の提供を平成 18 年度から開始した<sup>4)</sup>。これが対象とする現象は、30 年に 1 回という原則の基準に限らず、社会的影響が大きい、日降水量 100mm の大雨など比較的頻繁に起こる極端な現象も含めている。これにより、地方自治体は 30 年に 1 回などの頻度で起こる異常多雨の予測情報（確率降水量）が入手可能となる。しかし、異常気象による被害が各地で顕在化するかどうかの被害予測情報を与えるまでには至っていない。

集中豪雨は局地的な大雨であるため、発生する地点の即時的な予測は容易ではない。我が国で過去 30 年に集中豪雨が増加することが認められる中で、平成 20 年 8 月のような集中豪雨は繰り返し起こりうると考えられる。過去の集中豪雨の発生履歴から災害教訓を読みとり、今後の防災対策を講じる必要がある。いつ起こるか確定的でない異常気象に対して、どの程度の防災予算を投入すべきか明確ではない。このため、集中豪雨の発生頻度を推定し、それによって生じる被害を予測することが課題となる。これまでの集中豪雨の発生傾向と被害の履歴を教訓に、集中豪雨に備えるための防災予算の指標が求められると考える。本稿では、過去の集中豪雨の災害統計をいって、異常気象に備える際に防災投資や対策資金を調達する目安となる防災予算指標を設定する手法を提案する。

### 3. 集中豪雨の被害発生と被害量の予測

#### 3.1 集中豪雨被害の発生頻度・被害量モデル

過年度に  $n$  箇所で記録した集中豪雨の被害に着目する。集中豪雨の被害記録を2つの要素に分解し、被害発生の有無とそこで起こりうる被害を統一的に表現したモデル(Two-part model<sup>5)-8)</sup>として次式に定式化する。

$$l_i = r_i \times y_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

ここで、 $l_i$  : 地点  $i$  で記録した集中豪雨の被害、 $r_i$  : 地点  $i$  の集中豪雨の発生の有無、 $y_i$  : 地点  $i$  で発生した集中豪雨により起こる被害量を表す。集中豪雨被害の発生頻度が潜在的な傾向として観測されて、Tobit モデル<sup>5)-6)</sup>により表現されると仮定しよう。

$$r_i^* = x_i' \beta + \eta_i \quad (2)$$

ここで、 $r_i^*$  : 集中豪雨の発生確率の潜在変数、 $x_i' = (1, x_{i1}, \dots, x_{ik})$  : 地点  $i$  で集中豪雨被害の発生の要因となる共変数  $(k+1)$  次ベクトル、 $x_i'$  : ベクトル  $x_i$  の転置、 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)'$  : 豪雨被害の発生要因パラメータ  $(k+1)$  次ベクトル、 $\eta_i$  : 平均 0、分散 1 の標準正規分布に従う誤差項を表す。地点  $i$  における集中豪雨被害の発生は、潜在変数によりゼロを閾値に被害が発生するか否か  $(1, 0)$  の 2 値変数で定義する。

$$r_i = I(r_i^* > 0), \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

ここで、 $I(\cdot)$  : 不等式が成り立つときに 1 の値をとり、それ以外で 0 の値をとる指数を表す。このとき、地点  $i$  の集中豪雨被害の発生確率  $p_i$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} p_i &= \Pr(r_i = 1) = \Pr(\eta_i > -x_i' \beta) \\ &= 1 - \Pr(\eta_i < -x_i' \beta) = 1 - \Phi(-x_i' \beta) \\ &= \Phi(x_i' \beta), \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$  : 標準正規分布関数である。そこで起こる集中豪雨の被害は観測されている。被害量の潜在変数は正の値をとり  $y_i^* > 0$  と仮定する。 $y_i^* = 0$  は豪雨被害が発生していない状況である。集中豪雨による被害が発生したもて、被害の量を対数変換した潜在変数が正規分布に従うとして次式に定義する。

$$\log y_i^* = s_i' \gamma + \varepsilon_i \quad (5)$$

ここで、 $s_i' = (1, s_{i1}, \dots, s_{im})$  : 地点  $i$  で発生した集中豪雨の被害量を左右する共変数  $(m+1)$  次元ベクトル、 $\gamma = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_m)'$  : 被害量の誘因パラメータ  $(m+1)$  次ベクトル、 $\varepsilon_i$  : 平均 0、分散  $\sigma^2$  の標準正規分布に従う誤差項を表す。一般に、 $\log y$  が正規分布  $N(\mu, \rho^2)$  に従うとき、期待値は

$$E(y) = \exp(\mu + \rho^2 / 2) \quad (6)$$

である<sup>6)</sup>。各地点  $i$  の集中豪雨による被害量の期待値は

$$E[y_i^*] = \exp(s_i' \gamma + \sigma^2 / 2), \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

と表される。被害量の密度関数は対数正規分布に従い、次のように表される。

$$f(y_i^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma y_i^*}} \exp\left(\frac{-(\log y_i^* - s_i' \gamma)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

ここで、 $z_i = (\log y_i^* - s_i' \gamma) / \sigma$  と変換する。

$$(8) = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(z_i)^2}{2}\right) = \frac{1}{\sigma} \phi(z_i) \quad (9)$$

ここに、 $\phi(\cdot)$  : 標準正規密度関数を表す。各地点  $i$  で観測された集中豪雨の被害量は、豪雨被害の発生の有無に応じて次のように表される。

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & | (r_i = 1) \\ 0 & | (r_i = 0) \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

集中豪雨の被害量はそれが発生したときに限り一定量の値をとる。分析者は、地点  $i$  を監視し、豪雨が発生しないとき ( $r_i = 0$  のとき) でさえ、その地点で被害の大きさを左右する共変数の情報  $s_i$  を有している。もし、式(2) (4)において、共変数、パラメータ、誤差項が完全に一致すると、閾値ゼロの Tobit モデルの枠組みとなる<sup>5)-6)</sup>。地点  $i$  で集中豪雨の被害が発生することは直接制御は不可能である。地点  $i$  で集中豪雨が発生したときの浸水被害や土砂災害などの程度は防災対策により軽減可能となる。一般に、豪雨被害の発生有無と被害量が相互に依存関係があるとは限らない。式(2) (4)において、豪雨被害発生の誤差項と被害量の大きさの誤差項は独立であるならば、これが Two-part モデルの枠組みとなる<sup>5)-8)</sup>。被害量の分布は指数型に近くなるので、その傾向を表現するため対数正規分布を仮定している。Two-part モデルにおいて、各地点  $i (= 1, \dots, n)$  で観測された集中豪雨の被害履歴  $\{r_i, y_i\}$  の尤度関数は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} L &= \prod_{i=1}^n \{\Pr(r_i = 0)\}^{1-r_i} \\ &\quad \times \prod_{i=1}^n \{f(y_i | r_i = 1) \cdot \Pr(r_i = 1)\}^{r_i} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $p_i = \Pr(r_i = 1)$  とおいて整理する。

$$\prod_{i=1}^n \{(p_i)^{r_i} (1-p_i)^{1-r_i}\} \prod_{i=1}^n \{f(y_i | r_i = 1)\}^{r_i} \quad (12)$$

式(7)より、条件付き被害量の密度関数は次式で表される。

$$f(y_i | r_i = 1) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{\log y_i - s_i' \gamma}{\sigma}\right), \quad i = 1, \dots, n \quad (13)$$

したがって、集中豪雨の被害発生に関する尤度関数は次式のように導出される。

$$L = \prod_{i=1}^n [\Phi(x_i' \beta)]^{r_i} [1 - \Phi(x_i' \beta)]^{1-r_i}$$

$$\times \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma} \phi \left( \frac{\log(\max[y_i, 1]) - s'_i \gamma}{\sigma} \right) \right\}^{r_i} \quad (14)$$

式(12)を対数変換すると、次に表される。

$$\begin{aligned} \log L = & \sum_{i=1}^n r_i \log p_i + \sum_{i=1}^n (1-r_i) \log [1-p_i] \\ & + \sum_{i=1}^n r_i \log \phi \left( \frac{\log(\max[y_i, 1]) - s'_i \gamma}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^n r_i \log \sigma \end{aligned} \quad (15)$$

表記の便宜上、豪雨発生確率項は  $p_i = \Phi(x'_i \beta)$  である。ブロイデン法やブレント法など準ニュートン法<sup>9)-10)</sup>の汎用解法により、対数尤度関数式(13)を最大化するような最尤パラメータ ( $\hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{\sigma}$ ) を求めることが可能である。標準正規密度関数は数値積分により計算可能である。

### 3.2 一定頻度の豪雨被害に備える予算指標

対象期間内に各地点で発生した集中豪雨を観測して得られた豪雨被害量の観測値 ( $y_1, \dots, y_n$ ) に着目しよう。上述した集中豪雨被害の発生頻度・被害量モデルでは、地点  $i$  の豪雨被害量の確率変数  $Y_i$  が対数正規分布に従い、平均・分散パラメータは ( $s'_i \gamma, \sigma$ ) となる。対象期間内に一定の頻度で発生する被害量を指標化するため、各地点  $i$  における確率  $\delta$  の被害量の分位値 (パーセンタイル値)  $y_i^\delta$  を導出する。

$$\delta = \Pr(Y_i \leq y_i^\delta), i = 1, \dots, n \quad (16)$$

ここで、 $\delta \in \{0.95, 0.97, 0.99\}$  を用いることが多い。式(16)を変形していくと次式のように表される。

$$\begin{aligned} \delta = & \Pr(\log Y_i \leq \log y_i^\delta) \\ = & \Pr \left( \frac{\log Y_i - s'_i \gamma}{\sigma} \leq \frac{\log y_i^\delta - s'_i \gamma}{\sigma} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\delta = \Phi \left( \frac{\log y_i^\delta - s'_i \gamma}{\sigma} \right) \quad (18)$$

式(18)で標準正規分布の逆関数をとると次式になる。

$$\Phi^{-1}(\delta) = \frac{\log y_i^\delta - s'_i \gamma}{\sigma} \quad (19)$$

確率  $\delta$  の被害量の分位値  $y_i^\delta$  について整理する。

$$\begin{aligned} VaR_i^\delta & \equiv y_i^\delta(s_i | \gamma, \sigma) \\ & = \exp \left( \sigma \cdot \Phi^{-1}(\delta) + s'_i \gamma \right), i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (20)$$

このように、地点  $i$  における確率  $\delta$  の被害量の分位値 (以下、Value at Risk と呼ぶ) は、豪雨被害量の共変数に依存する形式に導出することができる。たとえば、確率  $\delta = 0.967$  の場合は、気象庁の定義に即して対象期間内に約30年に1回の確率で起こりえた集中豪雨の被害量を表す。被害量の分位値は、一定頻度で起こりえた被害量を指標化できるが、過去に経験した集中豪雨の被害教訓

に即した指標である。過去の教訓に根ざして集中豪雨の対策を進める際に有用な指標である。

さらに、一定頻度で起こりえた被害量の分位値を超過するシナリオのもとで、今後より極端な集中豪雨による被害量 (heavy-tail) が発生するとしたら、どの程度の被害量となるかを予測する指標を考えよう。地点  $i$  における被害量が、確率  $\delta$  の分位値  $y_i^\delta$  (Value at Risk) を超過したシナリオのもとでの被害量の平均値 (Conditional Tail Expectation) は次式で与えられる。

$$CTE_i^\delta(y_i^\delta) = E(Y_i | Y_i > y_i^\delta), i = 1, \dots, n \quad (21)$$

これは、確率  $\delta$  分位値と豪雨被害量の共変数に依存した形式に次のように導出できる (付録参照)。

$$\begin{aligned} CTE_i^\delta(y_i^\delta, s_i | \gamma, \sigma) & = \frac{1}{(1-\delta)} \exp \left( s'_i \gamma + \frac{\sigma^2}{2} \right) \\ & \times \left\{ 1 - \Phi \left( \frac{\log y_i^\delta - s'_i \gamma}{\sigma} - \sigma \right) \right\}, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (22)$$

以上のように、地点  $i$  で集中豪雨による被害量が、確率  $\delta$  の分位値 (Value at Risk) を超過したシナリオの下での被害量の期待値を算出することが可能となる。

## 4. 応用結果

### 4.1 対象地点と被害履歴

(財) 気象業務支援センターは、気象災害の統計を有償で提供し、1971年から1990年までの各都道府県における異常気象の災害を報告している<sup>11)</sup>。データ項目は、気象官署名、担当区域、西暦年、気象災害名、規模、発生地域、総観気象状況などである。以下では、1971年から1990年までの過去20年間を対象期間とする。この期間に、国内で大雨・強雨により異常気象の災害が発生した地点の記録を用いる。本稿は、集中豪雨被害の発生頻度とそれによる被害量を予測することに主眼がある。平成20年8月末豪雨の経験を参考に、激しい大雨が降った25都県の地点を対象とする。25都県とは、秋田、岩手、宮城、福島、茨城、埼玉、東京、千葉、神奈川、山梨、静岡、愛知、岐阜、三重、石川、奈良、和歌山、広島、徳島、愛媛、山口、福岡、長崎、宮崎、鹿児島である。

気象災害統計では、大雨・強雨が集中豪雨の被害値に該当する。死者・行方不明 (人)、全壊・流失 (棟)、住家の床上浸水 (棟)、堤防決壊 (箇所)、橋の流失 (箇所)、鉄軌道被害 (箇所)、山・がけ崩れ (箇所)、農業被害 (万円) などが統計される。本稿では、集中豪雨の被害として、住民に甚大な影響をもたらすおそれのある床上浸水被害 (棟) を対象とする。

### 4.2 集中豪雨の被害予測モデルの推定結果

住家の床上浸水 (棟) を対象に、被害の発生頻度・被害量の予測モデルを推定した結果を示す。表-1に、住家の床上浸水 (棟) の発生頻度・被害量の予測パラメータ

の推定値を示す。ここで、下付添字 GH は温暖化に係るパラメータを表し、ER は集中豪雨に係るパラメータを表す。ダミー変数とは、その状況が地点に該当する際に値 1 をとり、それ以外は値 0 をとる指数を表す（以下、同様）。年代区分ダミーは 1971～1975 年を基準とする。気圧配置ダミーはその他の低気圧を基準とする。発生規模ダミーは都県全域を基準とする。発生頻度のパラメータについて、東シナ海低気圧ダミーは負の値で 1% 有意となっている。その他の低気圧と比較すると、総観気象状況で東シナ海低気圧を観測した状況では、床上浸水被害が相対的に少ないと解釈される。一方、1976 年から 1990 年まで 5 年区分の年代はすべて正の値で 1～5% 有意となっている。1971 年から 1975 年までの 5 年間と比較すると、それ以降の 15 年間は、床上浸水被害が相対的に多く発生する結果となっている。被害量パラメータについて、異常気象の発生規模は、都県全域の場合と比較すると、局部地域や都県内 1/4～1/2 の範囲で発生する規模において、被害量が相対的に小さくなる結果となっている。床上浸水被害は、都県全域で広い範囲に豪雨が降った場合に被害量が多くなると解釈できる。降水量では、最大 1 時間降水量、最大日降水量、期間降水量が異常な値をとった際に、床上浸水被害が多くなる傾向にあると解釈される。

表-1 床上浸水被害のパラメータ推定結果

説明変数		パラメータ推定値	p値
発生頻度の定数	$\beta_0$	-0.12358	[.103]
二つ玉低気圧ダミー	$\beta_1$	0.24300	[.120]
東シナ海低気圧ダミー	$\beta_2$	-0.46810 ***	[.006]
1976-1980ダミー	$\beta_{3GH}$	0.41929 ***	[.000]
1981-1985ダミー	$\beta_{4GH}$	0.25189 **	[.017]
1986-1990ダミー	$\beta_{5GH}$	0.28942 ***	[.004]
被害量の定数	$\gamma_0$	2.49158 ***	[.000]
局部地域ダミー	$\gamma_1$	-1.46713 ***	[.000]
都県区内1/3～1/4程度ダミー	$\gamma_2$	-0.81012 ***	[.001]
都県区内の1/2程度ダミー	$\gamma_3$	-0.45847 **	[.022]
最大1時間降水量(mm)	$\gamma_{4ER}$	6.6124E-03 **	[.047]
最大日降水量(mm)	$\gamma_{5ER}$	2.2460E-03 ***	[.005]
期間降水量(mm)	$\gamma_{6ER}$	1.3545E-03 ***	[.001]
被害量の標準偏差	$\sigma$	2.13321 ***	[.000]

注。ここで、「\*\*\*」:  $p < 0.01$  で 1% 有意, 「\*\*」:  $p < 0.05$  で 5% 有意, 「\*」:  $p < 0.10$  で 10% 有意を表す。

#### 4.3 豪雨に備える防災予算指標の算定値

表-2 に、対象地点の推定結果から、異常気象の目安となる 30 年に 1 回の頻度で起こりうる被害予測値（対象地点の平均値）を示す。この 30 年に 1 回の被害を緩和するため、1 年当たりの防災投資額あるいは補償準備金の目安となる防災予算指標を示す。さらに、これまで経験したことのない新たな異常気象に備える防災予算指標として、30 年確率の被害量を超過した被害の期待値を示す。床上浸水被害は、棟数単位の予測であるが、防災予算指標とするため、治水経済調査マニュアル<sup>12)</sup>に準拠し、経済被害額を算定した。間接被害として、清掃労働対価と飲料水購入や通勤など代替活動に伴う支出増を算出した。水深は 45～50cm と想定し、マニユア

ルから清掃延べ日数 7.5 日、支出負担単価 147（千円／世帯）と設定した。清掃労働対価は、家屋資産の 10% とし、家屋 1 m<sup>2</sup> 評価額および固定資産の価格等の概要調査（家屋都道府県別表）の既存統計を用いて設定した。

表-2 被害予測値と防災予算指標（25 都県地点平均）

	30年に1回の頻度の被害予測値 ( $\delta=0.967$ )	1年当たりの被害予測値	VaR <sub>δ</sub> を超過する被害の期待値
対象地点平均	VaR <sub>δ</sub>	VaR <sub>δ</sub> /30	CTE <sub>δ</sub>
床上浸水被害(棟)	1186.2	39.54	4267.1
清掃労働対価(億円)	178.4	5.95	641.6
代替活動支出増(億円)	1.8	0.06	6.3

床上浸水被害では、30 年確率で 1,186（棟）、それを超過する被害期待値は 4,267（棟）となっている。防災予算指標として、清掃労働対価がほぼすべてを占め、飲料水や通勤など代替活動支出増は微少である。30 年確率の清掃労働対価は 178.4（億円）で、それを超過する新たな異常気象の被害値は 641.6（億円）と予測された。防災予算指標として、1 年当たり清掃労働対価は 5.95（億円／年）である。このように、1971～1990 年の過去 20 年間の記録から 30 年に 1 回の大雨・強雨による床上浸水被害を予測し、その被害を抑制・緩和するための防災予算指標を算出できた。図-1 に、被害量の実績値と予測値プロットを示す。原点を通る直線で近似すると回帰係数は 0.957 となり、一定規模以上の被害量において実績値と予測値の対応がとれている。ただし、床上浸水の実績値 3 棟未満（対数値 1 未満）など、小規模にとどまった異常気象の被害量予測には限界がある。この改善には、被害量が対数正規分布に従う仮定を極値分布に改良することが課題となる。

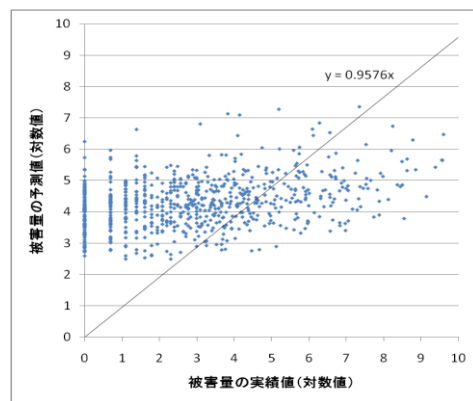


図-1 被害量の実績値と予測値プロット（各地点）

このように、異常気象の目安となる 30 年に 1 回の被害予測値を数値化することが可能である。これまでの経験を超えて、今後起こりうる新たな異常気象に備えて、30 年確率の被害を超過する被害の極大値を予測することも可能である。ここで計算した被害単位の予測値を経済単位の換算すると、どの程度の被害を想定した防災目標を設定するか、その被害の抑制・緩和のために、年度予算としてどの程度の防災投資や資金準備を行うかの目安となる防災予算指標を算出できる。本稿で提案した異常気象に応じた被害予測値は、集中豪雨の被害に備えた防災予算の設定に資するものと考えられる。



## 5. おわりに

本稿では、過去に記録された気象災害統計を用いて、集中豪雨の発生頻度に応じて起こりうる被害量をヒストリカルに予測する手法を提案した。あわせて、一定頻度の集中豪雨に備える防災予算指標の原型を導出した。実際に、本モデルを国内25都県の被害履歴を対象に、床上浸水被害に関して応用した結果を示すとともに、その有用性を示した。本手法は、異常気象の目安となる30年に1回の被害予測値を数値化することに加え、今後それを超過したシナリオに備え、30年確率の被害を超過する期待値も予測できる。被害単位の指標を経済被害に換算し、経験的に起こりうる集中豪雨の被害量をヒストリカルに計算できる。本モデルは、異常気象の災害教訓として、起こりうる被害規模の把握と豪雨対策予算の必要性に関して説明に資すると考える。

今後の課題に言及する。本稿では床上浸水（棟）の被害予測を行ったが、農業被害、山がけ崩れ等にも応用できる。農業被害は、金銭単位の統計であり直接経済被害を予測できる。山・がけ崩れは、箇所単位の統計で被害予測した値を経済換算する手法の開発が課題となる。本稿は温暖化に伴う異常気象として集中豪雨を対象に、災害履歴を用いた被害予測を行った。近年、頻発する地震や突風にも応用すると、異常気象の視点から新たな知見が得られる機会がある。例えば、全壊被害履歴を用いて、1981年の新耐震基準の前後で被害予測し耐震化の効果を事後評価できる。引き続き、突発的な異常気象に備えた防災予算計画に資する災害教訓や対策効果に関して、経験的な知見の蓄積に取り組んでいきたい。

**謝辞：**査読者より総合的な所見をはじめ、丁寧な修正意見を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

**付録. VaRを超過した下での被害量の期待値の導出**

$$f(y | y > y_i^\delta) = \frac{f(y)}{\Pr(Y > y_i^\delta)} = \frac{f(y)}{S(y_i^\delta)} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} (21) &= \int_{y_i^\delta}^{\infty} y \cdot f(y | y > y_i^\delta) dy = \int_{y_i^\delta}^{\infty} y \cdot \frac{f(y)}{S(y_i^\delta)} dy \\ &= (1-\delta)^{-1} \int_{y_i^\delta}^{\infty} y \cdot f(y) dy \end{aligned} \quad (24)$$

式(8)より、積分項は次式に表される。

$$\begin{aligned} &= \int_{y_i^\delta}^{\infty} y \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma y} \exp\left(-\frac{(\log y - s_i'\gamma)^2}{2\sigma^2}\right) dy \\ &= \int_{y_i^\delta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\log y - s_i'\gamma)^2}{2\sigma^2}\right) dy \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、次のような変数置換を定義する。

$$w = \frac{\log y - s_i'\gamma}{\sigma} - \sigma \quad (26)$$

両辺を微分すると、 $\sigma y \cdot dw = dy$ となる。式(26)を  $y$  について整理すると次式が得られる。

$$y = \exp(\sigma w + \sigma^2 + s_i'\gamma) \quad (27)$$

式(25)の指数項は、式(26)を用いて次のように表される。

$$\exp\left(-\frac{(w+\sigma)^2}{2}\right) = \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) \exp\left(-\sigma w - \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

よって、式(25)は次のように表される。

$$\int_{w_i^*}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) \exp\left(-\sigma w - \frac{\sigma^2}{2}\right) \sigma y dw \quad (28)$$

$$w_i^* \equiv \frac{\log y_i^* - s_i'\gamma}{\sigma} - \sigma \quad (29)$$

式(27)を用いて、式(28)の2番目の指数項は次式となる。

$$\exp\left(-\sigma w - \frac{\sigma^2}{2}\right) y = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2} + s_i'\gamma\right) \quad (30)$$

これを用いて、式(28)は次のように変形できる。

$$(28) = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2} + s_i'\gamma\right) \int_{w_i^*}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) dw \quad (31)$$

## 参考文献

- 1) IPCC, Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, S.Solomon et.al.(eds), Cambridge Univ. Press, 2007.
- 2) 気象庁, 気候変動監視レポート 2008, 2009.
- 3) 気象庁, 災害時気象速報, 平成 20 年 8 月末豪雨, 2008.
- 4) 気象庁, [www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap](http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap), 対象とする現象について, 異常気象リスクマップ.
- 5) Cragg, John G., "Some Statistical Models for Limited Dependent Variables with Application to the Demand for Durable Goods", *Econometrica* 39, No.5, pp.829-844, 1971.
- 6) Heckman, J.J., "Sample Selection as a Specification Error", *Econometrica*, 47, pp.153-161, 1979.
- 7) Duan, N. et al., "A Comparison of Alternative Models for the Demand for Medical Care", *Journal of Business and Economic Statistics*, 1, pp.115-126, 1983.
- 8) Hsiao Cheng, Chanseob Kim, and Grant Taylor, "A Statistical Perspective on Insurance Rate-Making", *Journal of Econometrics* 44, pp.5-24, 1990.
- 9) 大野 豊・磯田和男 監修, 数値計算ハンドブック, オーム社, pp.643-673, 1990.
- 10) 岩崎 学, 統計的データ解析のための数値計算法入門, 統計ライブラリー, 朝倉書店, pp.102-137, 2004.
- 11) (財) 気象業務支援センター, 気象災害の統計, 2010.
- 12) 国土交通省河川局, 治水経済調査マニュアル (案), 4.4 間接被害額の算定, pp.56-58, 2005.

(2010年8月6日受付)