

## 東京 23 区における降水変動を考慮した水害リスク評価手法の開発

平野淳平\*・大楽浩司\*

### A New Methodology to Assess the Impacts of Precipitation Change on Flood Risk in the 23 Wards of Tokyo

Junpei HIRANO and Koji DAIRAKU

\* Department of Integrated Research on Disaster Prevention  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
jhirano@bosai.go.jp, dairaku@bosai.go.jp

#### Abstract

In this study, we attempted to develop a new methodology for flood risk assessment in the Tokyo metropolitan area by considering the effect of precipitation change. By comparing the statistical distribution of the daily precipitation frequency for the whole study period, and those for flood occurrence days, we found that the distributions of the precipitation frequency for the flood occurrence days are corresponding to those for the whole study period. These results indicate that we can estimate flood damage based on frequency of daily precipitation. Based on these results, we estimated the flood damage for Tokyo based on distribution of daily precipitation frequency. We then created a flood-risk curve that represented the relationship between damage and exceeding probability of a flood. By comparing the newly developed flood-risk curve, based on the precipitation frequency, with those in the previous studies, we indicated that a newly developed flood-risk curve could evaluate the potential flood risk in Tokyo with high accuracy.

**Key words:** Flood risk, Precipitation change, Tokyo metropolitan area, Risk curve

#### 1. はじめに

地球温暖化に伴う降水量や降水頻度の増大は、海面上昇など諸要因と相まって水害リスクを高めると考えられる。例えば、Milly *et al.*, (2002) は、世界の多くの大河川流域において、再現期間 100 年を超える洪水の頻度が 20 世紀の間に顕著に増加しており、この傾向が今後も継続する可能性が高いことを指摘した。日本については、和田 (2006) が地域気候モデル RCM20 の予測結果をもとに、現在気候と将来気候における確率降水量を比較した結果、100 年後の 100 年確率年最大日降水量は全国的に増加し、洪水リスクが高まることを指摘している。

東京都市圏では、低平な土地に多くの資産と人口

が集中的に分布しているため、一度水害が発生すると甚大な被害が生じる可能性がある。将来の降水変動の影響を考慮した場合、従来の知見にもとづく適応策では、今後の水害被害に対して十分対処できなくなることが危惧される。気候変動の影響は地域によって異なると考えられるため、都道府県や市町村など、自治体レベルで気候変動の影響への対処を念頭に入れた新しい適応策を策定することが必要となっている。また、気候変動の影響とともに、土地利用・人口・世帯数など社会経済状況の変化も将来の水害リスクに影響を及ぼすと考えられる。したがって、気候変動の影響と、社会経済システムの脆弱性についての分析・評価・予測を実施し、自治体

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット

レベルでの適応策策定に資する新たな水害リスク評価手法を開発することが急務となっている。

一般に、気候変動は確率的に変化する事象であるため、気候変動の影響を考慮して水害リスクを評価するためには、水害リスクを確率的に評価・分析することが可能な手法を構築することが求められる。佐藤ほか(2009)では、現在気候と将来気候における降雨極値の分布データと氾濫モデルを用いて全国で氾濫シミュレーションを行い、その結果にもとづいて浸水被害を再現期間毎に評価し、全国の年平均被害期待額を算出した。また、福林・沖(2012)は、高頻度の降水イベントによる水害リスクを低頻度の降水イベントによる水害リスクと同時に評価し、両者を統合して、日本全国における内水氾濫被害リスクを推定する手法を構築した。しかし、これらの研究では、日本全国の水害リスクを評価対象としており、都道府県や市区町村など、自治体レベルでの水害リスクとその地域性については分析されていない。また、自治体レベルでの人口・世帯数・土地利用・産業構造など社会経済状況の相違については十分評価されていない。

自治体毎の水害リスクを確率的に評価・分析するための手法として水害被害額と年超過確率との関係を表す水害リスクカーブを用いることが有効である。平野・大楽(2012)、大楽・平野(2013)は、東京都市圏において都道府県毎に水害リスクカーブを用いて水害リスクを確率的に評価分析する手法を開発した。しかし、平野・大楽(2012)および、大楽・平野(2013)では降水変動の影響は考慮されていなかった。

本研究では、平野・大楽(2012)、大楽・平野(2013)が開発した確率的水害リスク評価手法をもとに、降水変動の影響を考慮することが可能な新たな水害リスク評価手法を開発することを目的としている。

## 2. 手法

### 2.1 F-D 法による被害額算出

平野・大楽(2012)、大楽・平野(2013)では、水害被害額を算出する方法のひとつである F-D 法(Frequency-Damage method)にもとづいて都道府県毎の水害被害額を算出している。F-D 法の基本的な考え方は、式(1)に示すように、対象地域の罹災件数と水害 1 件当りの平均被害額との積にもとづいて 1

年間の合計被害額(年間被害額)を算出するものである。

$$L=(F \times N) \times (D \times E) \quad (1)$$

ここで、L;年間被害額、F;罹災率、N;世帯数、D;平均損傷率、E;世帯当たり平均資産価値とする。

罹災率(F)は年間の罹災世帯数を全世帯数で割った値として算出される。平均損傷率(D)は、対象地域における世帯当たり平均一般資産価値に対する罹災世帯の平均被害額の割合として算出する。一般資産価値は、国勢調査等の一般統計データにもとづいて算出し、算出方法の詳細は、平野・大楽(2012)および、大楽・平野(2013)で詳述した。

式(1)で得られる水害被害額を確率的に評価するために、罹災率(F)および平均損傷率(D)に分布関数を当てはめ、モンテカルロ・シミュレーションにより 1 万年分の乱数を生成した。その上で、1 万年分の水害被害額(L)を都道府県別に求めた。

本稿では、式(1)において、罹災率(F)の頻度分布を降水量(P)の頻度分布で置き換えることによって、降水量の頻度分布が変化した場合の水害リスクを評価できる新たな手法を構築することを試みる。

### 2.2 降水-被害関係についての分析

式(1)において、罹災率(F)を降水量(P)の頻度分布で置換することによって、水害被害額を精度良く推定することが可能かどうかを検討するために、東京 23 区を対象として、降水量の頻度分布と水害被害額の頻度分布との対応との関係について分析した。ここで、東京 23 区を対象とした理由としては、資産価値が大きく、他の都県より大きな水害リスクが想定されること(平野・大楽, 2012)が挙げられる。



図 1 本研究で使用したアメダスデータの地点  
Fig. 1 Location of AMeDAS stations used in this study.

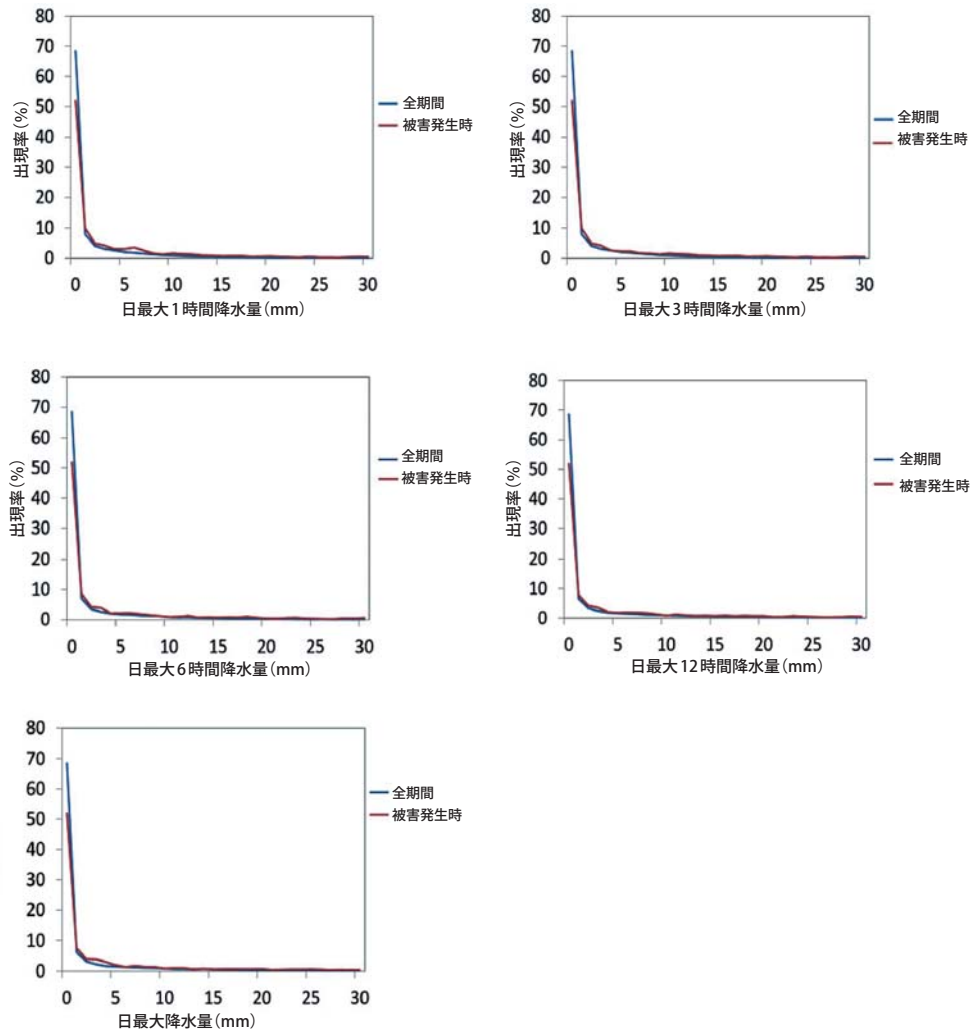


図 2 被害発生時と全期間における降水量頻度分布の比較

Fig. 2 Distribution of precipitation frequency for the whole study period and flood occurrence days.

降水量の頻度分布と被害との対応関係を検討するために、まず、東京 23 区におけるアメダス地点の降水量データ (図 1) を使用して、1976 年～2008 年における全期間の降水量の頻度分布と、東京 23 区のいずれかの区で内水氾濫被害が発生した際の降水量の頻度分布とを比較し、両者の関係について検討した。水害被害については、国土交通省河川局発行の「水害統計」データを使用して、東京 23 区内で内水氾濫被害が発生した日を特定した。アメダス降水データは領域平均せず、5 地点の集計データをすべて解析に用いた。

図 2 は、日最大 1 時間降水量、日最大 3 時間降水量、日最大 6 時間降水量、日最大 12 時間降水量と日降水量について、それぞれ 1976 年～2008 年における

全期間の降水量の頻度分布と内水氾濫被害が発生した際の降水量の頻度分布とを比較した結果である。この図から、いずれの時間スケールでも、全期間の降水量頻度分布と、被害発生時の降水量頻度分布は比較的良く類似していることがわかる。ただし、詳細に見ると、被害発生時には、全期間の頻度分布より弱い降水の頻度が少なく、強い降水の頻度が相対的に多い傾向が認められる。この結果は、水害被害は相対的に弱い降水イベントの際に発生しにくく、強い降水イベントの際に発生しやすいことを示している。したがって、降水頻度分布から被害額を推定するためには、大規模被害が発生しやすい強い降水イベントの頻度分布に着目する必要があると考えられる。

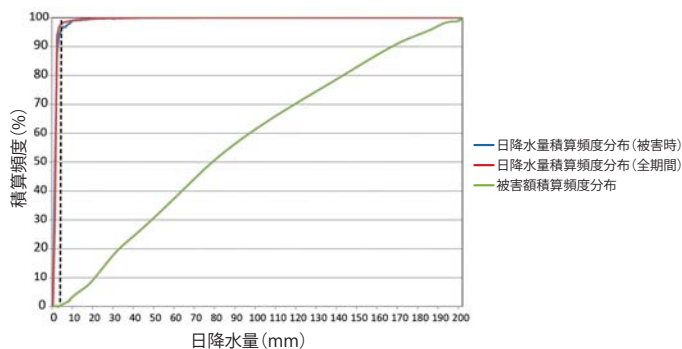


図 3 東京 23 区における日降水量と水害被害額の積算頻度分布

Fig. 3 Cumulative frequency distribution of daily precipitation and flood damage for the 23 wards of Tokyo.

図 3 では、日降水量頻度分布において、大規模被害が発生しやすくなる降水量の階級を明らかにするために、降水量階級別に降水頻度と水害被害額との関係を積算頻度曲線によって表した。ここで、日降水量 1 mm/day, 5 mm/day, 10 mm/day の 3 つの閾値を設定し、図 4 に示すように、閾値より弱い降水イベントを足切りし、被害発生時と全期間の降水量頻度分布の有意差の有無を U-検定によって有意水準 1% で検定した。その結果、日降水量 1 mm/day を閾値として用いた場合、両者の間には有意差が認められるが、5 mm/day, 10 mm/day を閾値として用いた場合には、両分布に有意差は見られないことが明らかになった。これらの結果から、日降水量 5 mm 以上では、被害発生時と全期間の降水量頻度分布はほぼ同一と考えてよいと考えられる。

図 3 の頻度曲線において、日降水量 5 mm 以下のイベントの頻度が降水の全頻度に対して占める割合は 85%, 10 mm 以下が 90% と非常に多い。一方、日降水量 5 mm 以下の際の被害額が全被害額に占める割合は、総被害額約 2,000 億円相当の中で 0.05% (約 100 億円相当)、日降水量 10 mm 以下の際に生じる被害額の割合は 0.09% (約 180 億円相当) と極めて少ない。

これらの結果は、弱い降水イベントは被害額に対する寄与は小さいが、頻度が多いので、降水量頻度分布から水害被害額を推定する際に、弱い降水を含めて推定を行うと、結果として推定精度が低下する可能性があることを意味している。したがって、降水量頻度分布において、弱い降水について足切りを

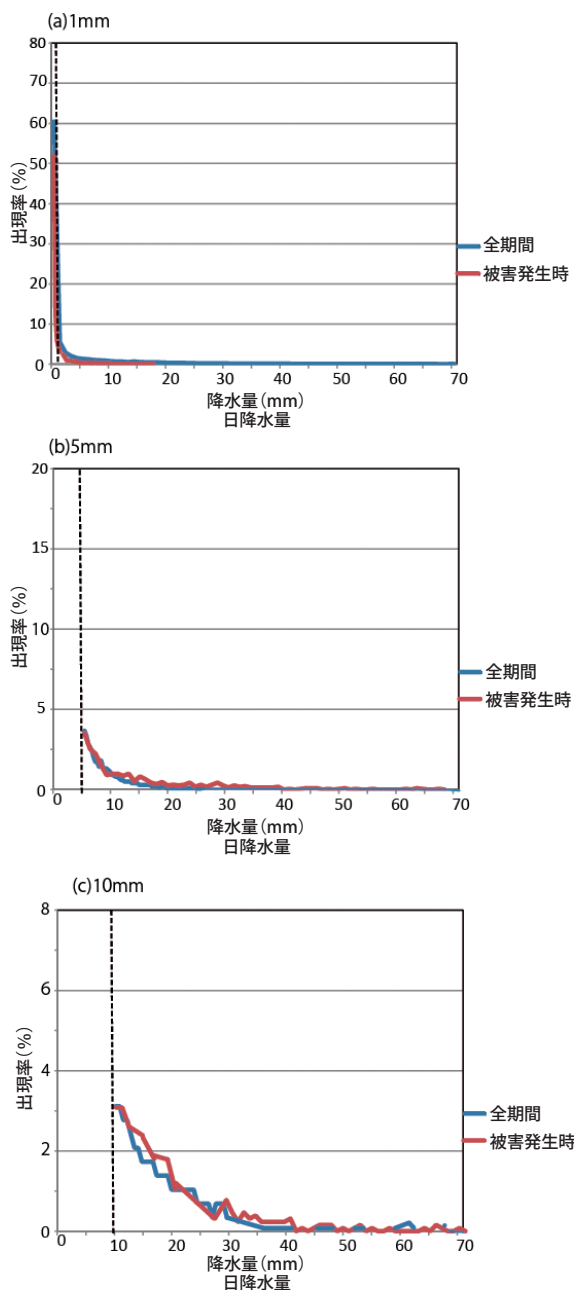


図 4 (a) 1 mm/day, (b) 5 mm/day, (c) 10 mm/day の閾値で足切りした日降水量の頻度分布

Fig. 4 Distribution of daily precipitation (a)  $\geq 1$  mm/day, (b)  $\geq 5$  mm/day, (c)  $\geq 10$  mm/day.

行った上で、被害額を推定する必要がある。図 3 で日降水量 5 mm 以上では、被害発生時と全期間の降水量頻度分布はほぼ同一と考えてよいと考えられるため、本研究では日降水量 5 mm を閾値とし、これより弱い降水イベントの足切りを行った上で被害額の評価を行った。



### 2.3 降水量頻度分布にもとづく被害額の推定

降水量の頻度分布と被害額との関係についての解析結果を踏まえて、式(1)のF-D法において、罹災率(F)の頻度分布を降水量(P)の頻度分布で置換することによって、年間被害額(L)を算出し、降水変動を考慮できる水害リスクカーブを構築することを試みた。年間被害額(L)は、以下に示す式(2)によって算出される。

$$L = (P \times N) \times (D \times E) \quad (2)$$

ここで、L；年間被害額，P；日降水量の頻度分布，N；世帯数，D；平均損傷率，E；世帯当たり平均資産価値とする。

式(2)で、年間被害額(L)を確率的に評価するために、降水量の頻度分布(P)と平均損傷率(D)について分布関数を当てはめた上で、モンテカルロ・シミュレーションを実行し、1万年分の乱数を生成する。平均損傷率(D)の算出方法と、平均損傷率(D)に対する分布関数当てはめについては、平野・大楽(2012)および、大楽・平野(2013)で詳細を説明したので、本稿では、降水量の頻度分布(P)に対する分布関数の当てはめについて説明する。

日降水量 5 mm 以上の全期間の降水量分布に対して分布関数を当てはめ、 $\chi^2$  検定によって有意水準 5 % で適合する分布関数の中から、赤池情報量基準(AIC)が最小になるものを最も当てはまりの良い分布関数として選択した。

表 1 は、日降水量 1 mm/day, 5 mm/day, 10 mm/day の 3 つの閾値で足切りした日降水量頻度分布に対して、各分布関数を当てはめた結果である。この

表 1 各閾値で足切りした降水量頻度分布(P)に当てはめた分布関数と赤池情報量基準値(AIC)  
※は選択された分布関数を示す。

Table 1 Fitting functions for daily precipitation frequency.

分布関数	AIC(1 mm)	AIC(5 mm)	AIC(10 mm)
指数分布	-233.2	-394.3 ※	-392.1
対数正規分布	-200.7	-392.4	-391.3
ガンマ分布	-199.3	-387.3	-380.1
一般化対数分布	-125.5	-325.7	-330.7
ワイブル分布	-110.3	-313.8	-316.8
ジョンソン SI	-110.2	-311.3	-300.1

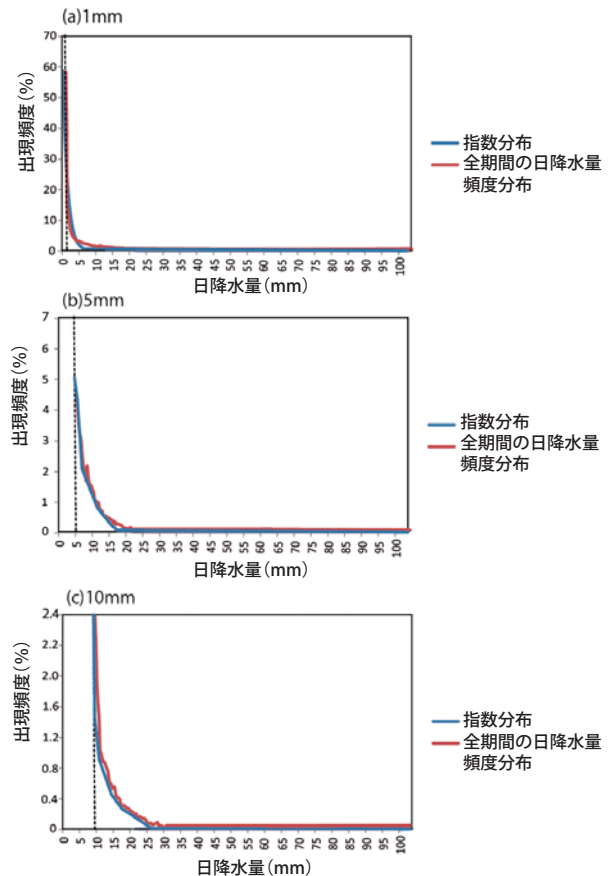


図 5 (a) 1 mm/day 以上, (b) 5 mm/day 以上, (c) 10 mm/day 以上の各降水量頻度分布と指数分布の当てはめ  
Fig. 5 Distribution of daily precipitation (a)  $\geq 1$  mm/day, (b)  $\geq 5$  mm/day, (c)  $\geq 10$  mm/day and fitting of exponential distribution.

表に示すように、5 mm/day で足切りした降水量頻度分布に指数分布関数を当てはめた場合に AIC が最小になることが明らかになった。図 5 は各閾値で足切りした日降水量頻度分布に指数分布を当てはめた結果である。1 mm/day を閾値とした場合と比べて、5 mm/day の閾値を用いた場合の方が降水量頻度分布は指数分布とより良く対応していることがわかる。

これらの結果から、5 mm/day で足切りした降水量頻度分布に対して指数分布を当てはめて被害推定を行うことが最も妥当であると判断した。

表 1 と図 5 の結果を踏まえて、指数分布を用いてモンテカルロ・シミュレーションを実行し、日降水量の頻度分布(P)の乱数を 10000 年分生成した。また、式(2)における平均損傷率(D)については、平野・大楽(2012)で示したように、最も当てはまりの良い対数正規分布を当てはめて、モンテカルロ・シミュ

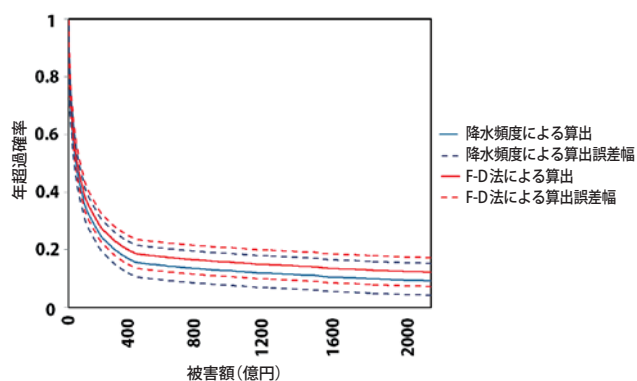


図 6 降水量頻度分布と F-D 法にもとづいて作成された水害リスクカーブ

Fig. 6 Flood risk curves based on precipitation frequency and Frequency-Damage method.

レーションを実行し、降水量の分布と同様に 10000 年分の乱数を生成した。その上で、式 (2) から東京 23 区における 10000 年分の水害被害額を算出した。算出された被害額について、年超過確率を求め、水害被害額と年超過確率との関係を水害リスクカーブによって図 6 に示すように表現した。

### 3. 結果

図 6 では、降水量の頻度分布にもとづいて作成したリスクカーブと、平野・大楽 (2012)、大楽・平野 (2013) で F-D 法にもとづいて作成されたリスクカーブを示し、両者を比較した。また、日降水量頻度分布 (P) に当てはめる分布関数の違いによって、算出結果にどの程度の不確実性が生じるのか明らかにするために、表 1 に示した 6 種類の分布関数を当てはめて被害額を算出した場合の年超過確率を計算し、その誤差幅を  $\pm 1\sigma$  で表した。F-D 法にもとづいて作成されたリスクカーブについても、平野・大楽 (2012)、大楽・平野 (2013) で罹災率 (F) 分布に対して当てはめた 6 種類の分布関数を用いた場合の算出結果の誤差幅を  $\pm 1\sigma$  で図中に示した。

図 6 において、降水量頻度分布 (P) にもとづくリスクカーブは F-D 法にもとづくリスクカーブと比較して、低頻度のイベントについて年超過確率をやや過小評価する傾向がみられる。例えば、被害額 2,000 億円のイベントの場合、F-D 法にもとづくリスクカーブでは、その年超過確率は 0.13 となるのに対して、降水頻度にもとづくリスクカーブでは年超過確率は 0.10 となる。ただし、両者の差は分布関

数の違いによる算出誤差幅に含まれる。また、降水量頻度分布 (P) にもとづくリスクカーブと F-D 法にもとづくリスクカーブについて、頻度分布の有意差の有無を U-検定によって有意水準 1% で検定した結果、両者の間に統計的な有意差は見られないことが明らかになった。これらの結果から、本研究では F-D 法の罹災率 (F) を日降水量 (P) で置換したことによって、F-D 法とほぼ同様の精度で東京 23 区における水害リスクを確率的に評価分析することが可能になったといえる。

### 4. まとめ

本研究では、地球温暖化に伴う気候変動に対する新たな適応策策定に向けた研究・開発プロジェクトの一環として、降水変動の影響を考慮して水害脆弱性を評価できる新たなリスク評価手法を開発した。

研究の結果、東京 23 区において、被害発生時の日降水量の頻度分布は全期間の日降水量の頻度分布と良く対応しており、基本的に水害被害を降水の頻度分布に関連付けて説明できることが明らかになった。

降水変動を考慮して水害リスクを確率的に評価した佐藤ほか (2009) や福林・沖 (2012) など、従来の研究では、日本全国を対象としていた。しかし、降水変動や社会経済状況の変化が水害リスクに及ぼす影響は、地域によって異なると考えられるため、気候変動適応策を立案するためには自治体毎の水害リスクを的確に評価することが求められる。東京 23 区において、降水変動を考慮した水害リスク評価手法を開発したことは、自治体レベルの適応策策定に向けて科学的知見を提供する上で意義があるといえる。

今後、数値気候モデルにもとづく将来の降水変動についてのシミュレーション結果を用いて、本稿で開発した手法にもとづいて将来の水害リスク評価を行い、気候変動の影響に伴う将来の水害脆弱性の変化の定量的評価を進める予定である。

本研究で使用した降水量データは図 1 に示すように、東京 23 区内 5ヶ所のアメダス地点で観測されたものであり、観測地点の分布には空間的な粗密がある。今後、本研究の手法を他の都道府県に適用する際には、使用する降水データの観測点密度が推定結果の不確実性に及ぼす影響についてさらなる検討が必要であると考えられる。

将来の水害リスクの変化は降水変動の影響だけではなく、世帯数、人口、土地利用などの社会経済的要因の変化の影響を受けると考えられる。式(2)では、平均損傷率(D)を算出する際に、資産価値や世帯数、産業別従業者数などの変数が用いられているので(平野・大楽, 2012), これらの社会経済指標の変化を考慮することが可能である。気候変動に対する緩和策や適応策を実施することによって、社会経済状況も変化すると考えられる。緩和策や適応策を実施した場合の社会経済シナリオは, Yamagata *et al.*, (2013) などによって作成されている。今後は、降水変動の影響とともに、これらの社会経済シナリオを考慮して、将来の水害リスク評価を行う予定である。

### 謝辞

本研究を遂行するに際して、国立環境研究所の山形与志樹主席研究員、瀬谷創特別研究員、東京工業大学の中道久美子助教、防災科学技術研究所の中根和郎研究参事、東京都環境科学研究所の常松展充研究員、損害保険料率算出機構リスク業務室の皆様、および防災科学技術研究所・社会システム研究領域・災害リスク研究ユニットの皆様には、貴重なコメントとご助言をいただきました。お世話になった皆様に謝意を表します。なお、本研究は文部科学省による気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)および、気候変動リスク情報創生プログラム(SOUSEI)の一部として行いました。

### 参考文献

- 1) Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., and Delworth, T. L. (2002): Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, **415**, 514-517.
- 2) 和田一範・川崎将生・富澤洋介・楠昌司・栗原和夫(2008): 高解像度全球モデルおよび地域気候モデルを用いた地球温暖化にともなう洪水リスクの評価. *水文・水資源学会誌*, **21**, 12-22.
- 3) 佐藤 歩・川越清樹・風間 聡・森杉壽芳(2009): 気候モデルを利用した日本列島洪水リスク評価. *水工学論文集*, **53**, 847-852.
- 4) 福林奈緒子・沖 大幹(2012): 日降水量に基づく日本全体の内水被害リスク推定. *水工学論文集*, **68**, 1075-1080.
- 5) 平野淳平・大楽浩司(2012): 東京都市圏における水害リスク評価手法の開発. *防災科学技術研究所研究報告*, **80**, 21-26.
- 6) 大楽浩司・平野淳平(2013): 東京都市圏における水害リスク評価手法の開発. *水工学論文集*, **57**, 21-26.
- 7) Yamagata, Y., Seya, H, and Nakamichi, K (2013): Creation of future urban environmental scenarios using a geographically explicit land-use model: A case study of Tokyo, *Annals of GIS*, **19**, 153-168.  
(2013年11月1日原稿受付,  
2013年12月6日改稿受付,  
2013年12月26日原稿受理)

## 要 旨

本研究では、地球温暖化に伴う気候変動に対する新たな適応策策定に向けた研究・開発プロジェクトの一環として、降水変動を考慮に入れて、自治体レベルで水害脆弱性を評価することができる新たな水害リスク評価手法を考案した。過去の降水量データを使用して被害発生時と全期間の降水量頻度分布を比較した結果、両者の分布は良く対応しており、基本的に降水量の頻度分布で水害被害を推定可能なことが明らかになった。降水量の頻度分布を用いて被害額の推定を行い、被害額と年超過確率との関係を表す水害リスクカーブを作成した結果、降水量頻度分布にもとづいて自治体レベルの水害リスクを高い精度で評価できることが明らかになった。

**キーワード：**水害リスク，降水変動，東京都市圏，リスクカーブ