

レーダ雨量を用いた内水氾濫危険度予測のための浸水実績に基づく検証

小野貴之^{*†}・下瀬健一^{*}・三隅良平^{**}

Verification of Radar Rainfall Estimation for Internal Flooding Risks Using Inundation Records

Takayuki ONO^{*†}, Ken-ichi SHIMOSE^{*}, and Ryohei MISUMI^{**}

**Storm, Flood and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
kshimose@bosai.go.jp*

Abstract

In recent years, climate change (e.g., global warming) has increased the severity and frequency of localized heavy rainfall events in various regions of Japan. As a result, internal flooding, in which rainwater accumulates on the ground surface in low-lying areas, has been occurring frequently. In Tokyo, there is concern about the storage and infiltration capacity of rainwater due to urbanization. Therefore, the Tokyo Metropolitan Government has been promoting the construction of a sewerage system that can drain rainfalls of 50-75 mm h⁻¹, however, internal flooding has been occurring every year. In this study, to forecast risk from internal flooding in urban areas using radar rainfall estimates, we verified radar rainfall estimates based on inundation records. A relationship between accumulated rainfall of 60 min or less and effective rainfall with a half-life of 90 min or less with the occurrence of internal flooding indicates that monitoring the accumulated rainfall for the short time period of 10 min might be a useful method for forecasting internal flooding risks in an urban area.

Key words: Internal flooding, Inundation record, Radar rainfall estimation, Accumulated rainfall, Effective rainfall

1. はじめに

近年、地球温暖化等の影響により、日本各地においてゲリラ豪雨とも呼ばれる局地的大雨が激甚化・高頻度化している。気象庁によると、全国の1時間降水量 50 mm 以上の非常に激しい雨の年間発生回数は、最近 10 年間 (2013 年～2022 年) では約 328 回と、統計当初の 10 年間 (1976 年～1985 年) での約 226 回と比べて約 1.5 倍に増加しており¹⁾、これに伴い内水氾濫が低内地を中心に多発している。

内水氾濫とは、本川の堤防の決壊、または堤防からの溢水によって発生する外水氾濫と区別し、低内地等に周囲から雨水が流れ込むとともに、排水用の

水路や小河川の水位が上昇し、溢水する等して発生する洪水現象である²⁾。通常、地表面に流入した雨水は土壌の浸透や排水管等を経て河川へと流出するが、地表面からの流出量を上回る強度の降雨があった場合、雨水は地表面に貯留し、内水氾濫を引き起こす。

都市部の多い東京都は、内水氾濫による浸水被害リスクが他の地域に比べて高い。松下ほか (2012)³⁾ は、東京都の都市部において、都市化に伴う畑地等の宅地化や地表面の舗装化等によって地下への雨水の貯留・浸透能力が低下し、局地的大雨による都市部の内水氾濫被害が多発する傾向があると指摘して

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

** 日本大学 文理学部 地球科学科

† 現所属：東京消防庁 防災部 震災対策課

いる。また、国土交通省によると、平成 20 年から平成 29 年までの 10 年間における全国の内水氾濫被害額は、外水氾濫を含めた全体の浸水被害額（約 1.8 兆円）のうち 41%（約 0.7 兆円）であったが、東京都における内水氾濫被害額の割合は 71%（約 429 億円）と大部分を占めていた⁴⁾。これらに加え、近年の非常に激しい雨の増加を受けて、東京 23 区においては時間雨量 50 mm への対応を基本とし、浸水被害の影響が大きい大規模地下街や甚大な浸水被害が発生している地区においては時間雨量 75 mm の降雨に対応するための下水道整備を推進しているが⁵⁾、毎年のように内水氾濫による浸水被害が発生している。

内水氾濫は、地表面からの流出量を上回る強度の降水があった場合に発生するため、どの程度の雨量で内水氾濫が発生するかを把握することが重要である。尾崎ほか(2015)⁶⁾は、内水氾濫解析精度に関する事例解析を行い、雨量の積算時間が長くなると雨量が平準化されることから、内水氾濫の解析精度を高めるためには雨量が平準化されないようになるべく積算時間の短いデータを用いた方が良いと指摘している。しかしながら、過去の内水氾濫と雨量の関係を調査した研究は事例解析にとどまるものがほとんどであり、統計的な調査は行われていない。

本研究では、都市部における内水氾濫発生の可能性をレーダによる推定雨量を用いて予測することを目的として、東京 23 区および多摩地区においてレーダ雨量から算出した 10 分間から 60 分間までの積算雨量と半減期 10 分間から 90 分間までの実効雨量を用いて、過去の内水氾濫による浸水実績データとの検証を行った。様々な時間スケールの積算雨量および半減期の実効雨量と内水氾濫による浸水実績の関係性を調査し、レーダ雨量の積算時間の違いによる内水氾濫発生の捕捉率を検証することで、レーダ雨量を用いた内水氾濫危険度予測の実現可能性についての検討を行った。

本論文は以下のように構成されている。まず第 2 節では、本研究で使用した雨量データおよび浸水実績データ等の各種データについて述べる。第 3 節では、本研究で用いた解析手法について説明する。第 4 節では、積算雨量および実効雨量と内水氾濫による浸水実績との関係性についての検証結果を示す。第 5 節では解析結果についてその利用可能性を考察し、最後に第 6 節においてまとめを行う。

2. 使用データ

本研究では、雨量と内水氾濫発生の関係性の調査を目的とすることから、XRAIN 雨量データと浸水実績データを使用した。加えて、浸水地点における雨量の出現頻度を確認するために、気象庁のアメダス雨量データを用いた。以下、各種データの詳細について記述する。

2.1 XRAIN 雨量データ

浸水実績との関係性の解析に用いた雨量データは、国土交通省が運用する XRAIN によるレーダ雨量データ（250 m メッシュ、1 分毎）である。この雨量データから以下を計算して使用した。

- 10 分間～60 分間積算雨量
- 半減期 10 分間～半減期 90 分間実効雨量

積算雨量は、特定の時刻の前 10 分間の 1 分間雨量を積算した 10 分間積算雨量を基にそれぞれ積算して求めた。また、実効雨量はある特定の時刻から半永久的に遡った時刻における 10 分間積算雨量を基に、以下の計算式(1)に基づいて表される⁷⁾。

$$R_w = \sum_i 0.5^{i/T} R_i \quad (1)$$

このとき、 R_w は実効雨量、 R_i は i 分前の 10 分間積算雨量、 T は半減期を表している。 R_w は、ある時刻から半減期前の積算雨量が半減するように減少係数 i/T を乗じて積算された雨量の総和であることを示している。つまり、実効雨量は過去に降った雨量の影響を時間とともに減少させて計算した雨量の目安であり、流出などによって地表面から雨水が失われる影響を考慮した指標となり得る。都心部は雨水の浸透が少なく、降雨は比較的短時間で排水溝等を通じて流出してしまうことから、当該時間スケールに合致する雨量指標を探し出すために、今回は様々な半減期の実効雨量についても併せて検証を行った。本研究では、減少係数が十分大きくなる 24 時間前以前のデータは取り扱わないこととした。

2.2 浸水実績データ

解析に用いた浸水実績のデータは、東京都建設局⁸⁾および各区市町村のホームページ上で公表している浸水実績のテキストデータ^{9)~19)}を複合的に用いた。浸水実績データは平成 30 年 5 月 1 日以降を対象とし、東京 23 区および多摩地区内で浸水が発生した全 13 事例のうち、気象庁の過去の天気図²⁰⁾を基に台風の影響が考えられる大雨である 3 事例

と、XRAIN 雨量データが減衰により正確な雨量を計測できていない可能性がある 1 事例を除く、計 9 事例を抽出して検証を行った。

解析対象期間は平成 30 年 5 月 1 日以降とし、東京都建設局のホームページで公開されている浸水実績は令和 2 年末まで、各区市町村で公開されている浸水実績はそれぞれ表 1 に示される期日までを対象とした^{9)~19)}。表 1 における浸水実績確認期間最終日とは、各区市町村が浸水実績を作成するにあたり最後に確認した日付のことである。東京都建設局および各区市町村で公開されている浸水実績はどちらも日データであり、浸水地点が番地以下まで記載されているデータもあったが、基本的には町丁単位に揃えて使用した。また、浸水発生の原因について、東京都建設局の浸水実績は「原因」が「内水」および「溢水」、ならびに「窪地内水」のいずれかに該当するものを抽出した。一方で、各区市町村の浸水実績データは明確な原因の記載があるものと無いものがあったため、原因の記載があった世田谷区の浸水実績については、その記載どおりに判別して用い、その他の原因の記載が無い区市町村の浸水実績データについては全てのデータを抽出して使用した。

表 1 各区市町村の浸水実績確認期間最終日^{9)~19)}
Table 1 Latest day of the period for confirming the flooding records of each municipality.

区市町村	浸水実績確認期間最終日
狛江市	令和3年9月1日
世田谷区	令和3年12月31日
調布市	令和3年8月15日
東村山市	令和4年7月12日
板橋区	令和4年5月30日
品川区	令和2年3月31日
武蔵野市	令和4年11月30日
文京区	令和4年1月17日
目黒区	令和4年3月31日
練馬区	平成30年8月27日

2.3 アメダス雨量データ

本研究で対象とした浸水実績における内水氾濫発生時の雨量がどれぐらいの頻度で発生しているかを確認するために、気象庁のアメダス観測地点のうち、本研究における解析対象領域内に存在する 10 の観

測地点の 10 分間積算雨量データを用いた。使用したデータの期間は、平成 30 年から令和 4 年までの 5 年間のうち夏季である 7 月から 9 月である。

3. 解析手法

本研究では、まず浸水実績を Geographic Information System (以下、GIS という) 上に取り込み、可視化することで解析対象領域内における浸水実績の分布を調査した。次に、XRAIN 雨量については、GIS 上で可視化して比較するとともに、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムを作成し解析を行った。この際、XRAIN 雨量データの使用にあたっては、本研究で使用した浸水実績が日データであることから、各種雨量の日最大値を算出して使用した。また、内水氾濫発生時の雨量の出現頻度の確認のため、解析対象領域内におけるアメダスの観測雨量との比較を行った。最後に、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムを基に各 XRAIN 雨量の浸水捕捉率を算出し、その特徴から雨量閾値を算出した。以下、各手法の詳細について記述する。

3.1 浸水実績データベースの作成および可視化

内水氾濫による浸水実績の抽出を行うため、各所ホームページ上で公開されている浸水実績データを、ArcGIS (Esri Japan) を用いて、政府統計の総合窓口からダウンロードした東京都全域の行政区域データの shp ファイル²¹⁾に追加した。手法としては、まず GIS に当該 shp ファイルを読み込ませ、レイヤーの属性テーブル上で新たに「浸水年月日」フィールドを作成し、各浸水実績の年月日を入力することでデータベースを作成した。次に、浸水実績のレイヤーにおいて、フィーチャーのエクスポートを用いて「浸水年月日」が一致するフィーチャーを抽出することで、当該年月日の浸水実績をポリゴン形式で GIS 上に表示できるようにした。また、国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービス²²⁾より取得した都道府県境界情報を用いて都境のレイヤーを作成した。

3.2 XRAIN 雨量と浸水実績の関係およびアメダス雨量による降水発生頻度の確認

内水氾濫による浸水実績と XRAIN 雨量の関係性を定量的に検証するため、浸水地点を包括する各行政区域の町丁名毎に算出した XRAIN による各時間

スケールにおける積算雨量および各半減期における実効雨量の日最大値における浸水地点数を 1 件とし、5 mm 間隔の雨量帯毎に存在する浸水地点数のヒストグラムを作成した。

また、解析対象領域内におけるアメダス観測地点で観測された 10 分間積算雨量を用いて、積算雨量および実効雨量のヒストグラムを作成し、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムと比較することで内水氾濫を発生させ得る雨量の出現頻度の確認を行った。この際、本検証で利用した浸水実績が日別データであったことから、アメダス雨量を基に積算した各種雨量についても日最大値を用いた。

3.3 XRAIN 雨量と浸水実績の水平分布の比較

浸水実績と XRAIN 雨量の水平分布を比較するために、積算雨量と実効雨量ともに、浸水実績確認日における日最大値をメッシュ毎に算出した。これらの最大値は NetCDF 形式で作成したことから、ArcGIS の解析ツール「NetCDF ラスターレイヤーの作成」を用いてラスターレイヤーを作成し、マップ上に降水強度を色別に表示した。これにより、GIS

上において雨量情報と浸水実績の両方を可視化して比較することを可能とした。

3.4 浸水地点数と各種雨量指標の雨量帯別浸水捕捉率の算出

内水氾濫発生の際となる雨量について検討するため、3.2 において作成した浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムを基に各時間スケールにおける積算雨量および各半減期における実効雨量の浸水捕捉率(全体の浸水地点数に占める閾値となる雨量帯以上の浸水地点数が占める割合)を求め、XRAIN 雨量と浸水実績の関係性を定量的に調査した。

4. 解析結果

まず、可視化した浸水実績を基に東京都における浸水実績分布の特徴について調査を行った。続いて、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムと解析対象領域内におけるアメダス雨量ヒストグラムの作成および双方の比較を行い、内水氾濫を発生させ得る雨量の出現頻度の確認を行うとともに、浸

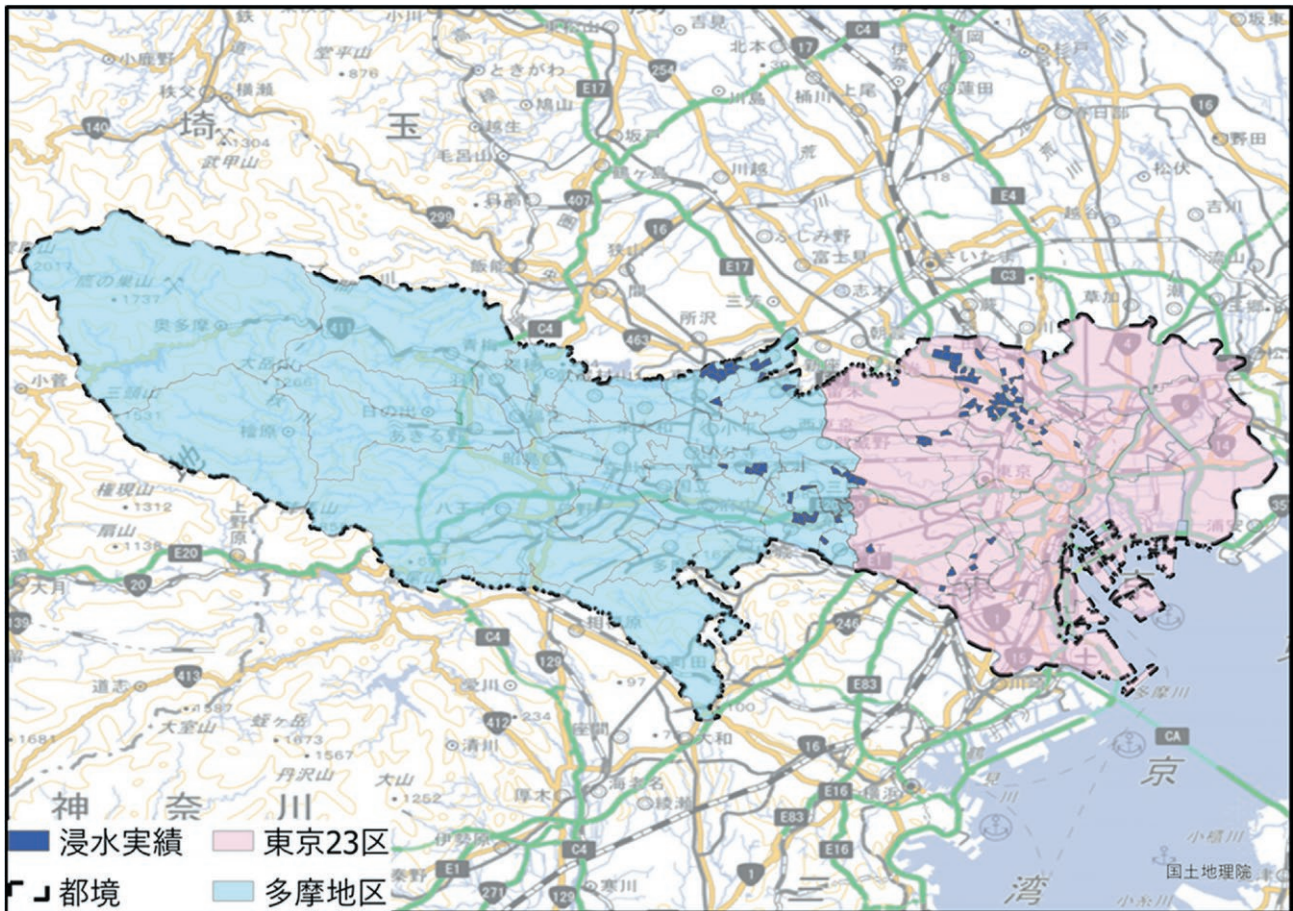


図1 東京 23 区および多摩地区の内水氾濫による浸水実績(平成 30 年 5 月 1 日～令和 4 年 7 月 12 日)

Fig. 1 Actual inundation due to internal flooding in the 23 cities of Tokyo and Tama area (from 1 May 2018 to 12 July 2022).

水実績を XRAIN 雨量と重ねた水平分布図を示すことで浸水実績と強雨域の一致の有無を調査した。更に、XRAIN 雨量による浸水実績の浸水捕捉率を計算し、浸水実績と XRAIN 雨量の関係性の統計的解析を行うことで閾値の算出を行った。

4.1 浸水実績の可視化

図 1 は、東京 23 区および多摩地区における平成 30 年 5 月 1 日から令和 4 年 7 月 12 日間の浸水実績の水平分布である。これによると、板橋区や北区等の東京都北部、調布市や世田谷区等の多摩川流域、加えて東村山市や東久留米市、清瀬市等の多摩地区に浸水実績が集中している。

一方で、山林等が多い東京都西部では、平成 30

年 5 月 1 日から令和 4 年 7 月 12 日までの間において、浸水は確認されていないことが分かる。

4.2 XRAIN 雨量と浸水実績の検証およびアメダス雨量による降水発生頻度

ここでは、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムを算出するとともに、アメダス雨量の夏季におけるヒストグラムを算出して比較することで、内水氾濫を引き起こす雨量の出現頻度を示す。

4.2.1 浸水地点における XRAIN 雨量分布

まず、図 2 および図 3 に浸水地点での XRAIN による 60 分間積算雨量分布および 60 分間の降水強度に換算した 10 分間積算雨量分布を表すヒストグラムを示す。これによると、どちらも山型の正規分布を

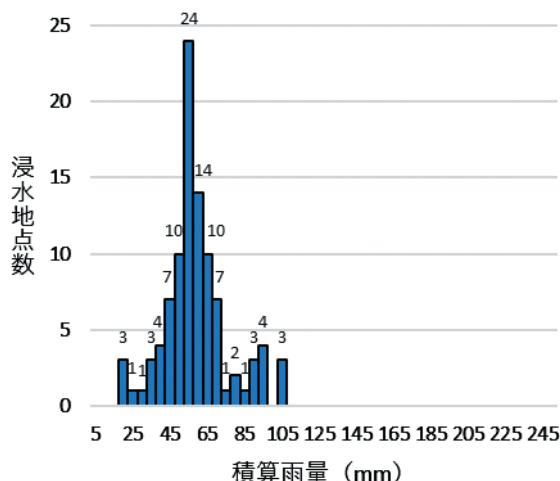


図 2 浸水地点での XRAIN による 60 分間積算雨量分布を表すヒストグラム

Fig. 2 Histogram of 60-minute accumulated rainfall by XRAIN at inundation sites.

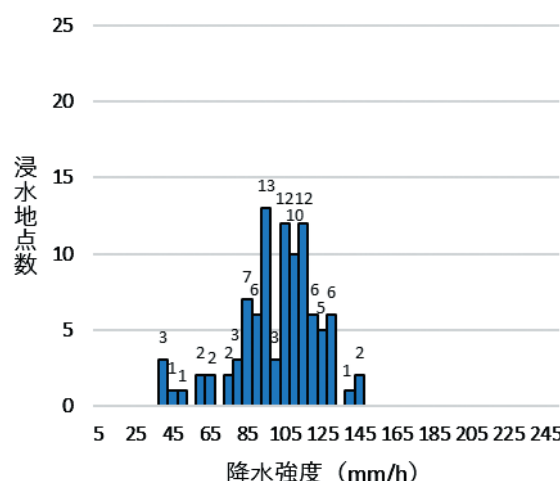


図 3 浸水地点での XRAIN による 10 分間積算雨量 (降水強度換算) 分布を表すヒストグラム

Fig. 3 Histogram of 10-minute accumulated rainfall (converted to precipitation intensity) by XRAIN at inundation sites.

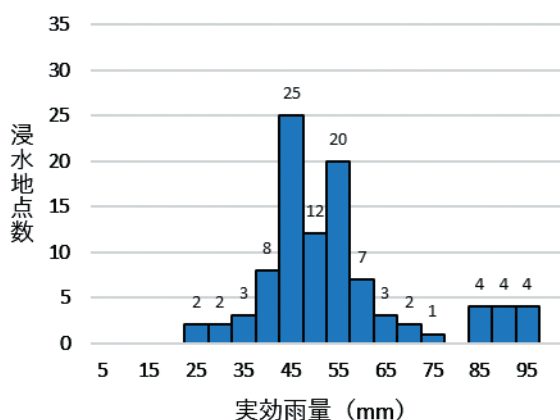


図 4 浸水地点での XRAIN による半減期 90 分間実効雨量分布を表すヒストグラム

Fig. 4 Histogram of effective rainfall with half-life period 90 minutes by XRAIN at inundation sites.

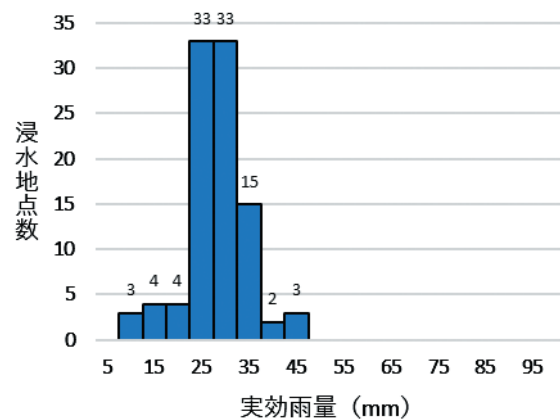


図 5 浸水地点での XRAIN による半減期 10 分間実効雨量分布を表すヒストグラム

Fig. 5 Histogram of effective rainfall with half-life period 10 minutes by XRAIN at inundation sites.

示しているが、10 分間積算雨量では降水強度の最大値が 140 ～ 145 mm と、60 分間積算雨量の最大値である 100 ～ 105 mm と比較して大きく、同一雨量帯における浸水地点数の最大値が小さいことが分かる。

次に、**図 4** および **図 5** に浸水地点での XRAIN による半減期 90 分間実効雨量分布および半減期 10 分間実効雨量分布を表すヒストグラムを示す。積算雨量と同様に、どちらも山型の正規分布を示しており、半減期 10 分間実効雨量では最大雨量が 40 ～ 45 mm 未満と、半減期 90 分間実効雨量の最大雨量である 90 ～ 95 mm と比較して小さく、同一雨量帯における浸水地点数の最大値が大きいことが分かる。

4.2.2 XRAIN 雨量とアメダス雨量の比較

本研究で対象とした浸水実績において、内水氾濫を発生させ得る雨量がどれぐらいの頻度で発生しているかを確認するために、アメダス雨量分布のヒストグラムを作成し、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムと比較した。**図 6** はアメダスの 60 分間の降水強度に換算した 10 分間積算雨量分布を表すヒストグラムを示している。**図 6** では、浸水地点での XRAIN による降水強度に換算した 10 分間積算雨量の分布を示すヒストグラム(**図 3**)において、浸水地点数が確認されなかった 35 mm h⁻¹ 以下の降

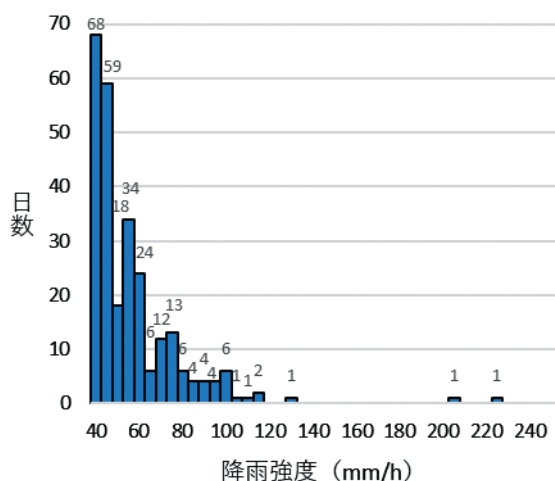


図 6 解析対象領域内のアメダス 10 地点での 10 分間積算雨量 (降水強度換算) 分布を表すヒストグラム (平成 30 年～令和 4 年夏季)。グラフ横軸は、35 mm h⁻¹ 以下の降水強度を表示していない。

Fig. 6 Histogram of 10-minute accumulated rainfall (converted to precipitation intensity) at 10 AMeDAS sites in the analysis domain (summer season: from 2018 to 2022). The horizontal axis does not show rainfall rate of 35 mm h⁻¹ or less.

水強度をグラフから除いている。

図 3 と **図 6** を比較すると、浸水地点での XRAIN による降水強度に換算した 10 分間積算雨量の分布を表すヒストグラムでは、降水強度 70 ～ 75 mm 付近から浸水地点数が増加しているが、その雨量帯以上において、アメダスの同雨量帯の観測日数が 5 年間 10 地点で 44 日であり、1 年間・1 地点あたり約 0.9 日であった。また、その他の時間スケールにおける積算雨量および半減期の実効雨量においても、同様であった (図は省略)。以上のことから、積算雨量および実効雨量のどちらにおいても、浸水地点数が多い雨量帯について見ると、内水氾濫が発生するほどの雨量の出現頻度は非常に低かった。

4.3 XRAIN 雨量および浸水実績の水平分布の比較

ここでは、浸水実績の水平分布を事例別に XRAIN 雨量の水平分布と比較し、その特徴について記述する。**図 7** は、各浸水事例における浸水実績と 60 分間積算雨量の水平分布を示したものである。これによると、浸水実績における 60 分間積算雨量が概ね東京都の下水道整備基準の時間雨量 50 mm の基準を超えているが、一部の地点について、浸水が生じていない事例もある。また、令和 3 年 8 月 15 日および令和 4 年 7 月 12 日の事例では、全ての浸水地点での 60 分間積算雨量が 40 mm 以下となっており、東京都の基準雨量以下の降雨でも浸水が発生していることが分かる。

4.3.1 浸水実績と XRAIN 積算雨量の水平分布

図 8 および **図 9** は、全ての浸水地点での XRAIN による 60 分間積算雨量が 40 mm 以下であった令和 3 年 8 月 15 日および令和 4 年 7 月 12 日の事例における浸水実績と各時間スケールにおける積算雨量の水平分布を示しており、60 分間の降水強度に換算してある。これを見ると、令和 3 年 8 月 15 日の浸水事例では、調布市の浸水地点での 10 分間積算雨量の降水強度が 60 mm h⁻¹ 以上と、周囲よりも高い値となっており、短期的には比較的強い降雨があったことが分かる。また、令和 4 年 7 月 12 日の事例についても、浸水地点での 10 分間積算雨量および 20 分間積算雨量の降水強度が 50 mm h⁻¹ を超えており、積算時間が短くなるほど浸水地点が降水強度の強い範囲と一致することから、短時間積算雨量については比較的強い降水であったことが分かる。

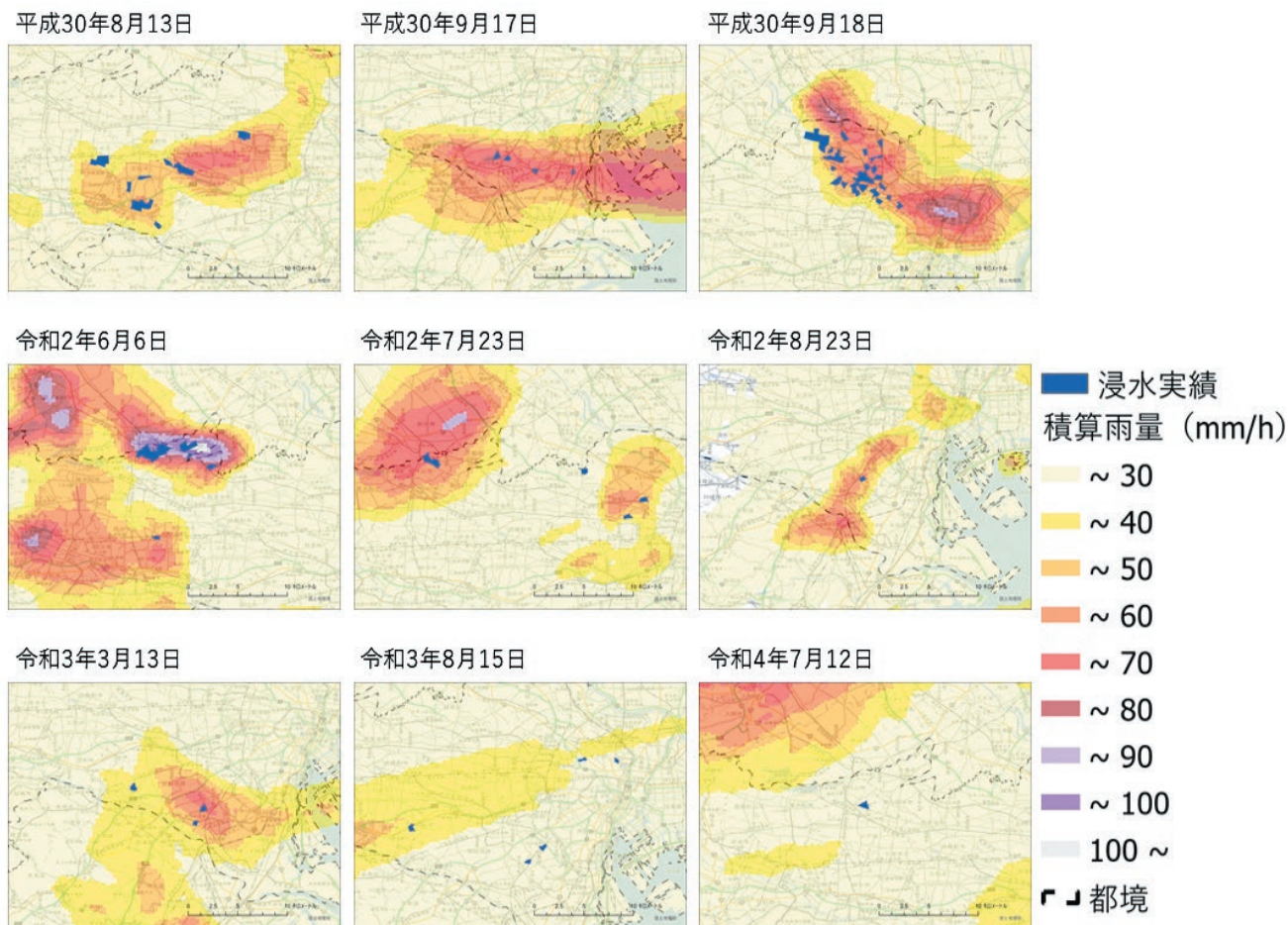


図7 各事例の浸水実績とXRAINによる60分間積算雨量の日最大値の水平分布

Fig. 7 Horizontal distribution of daily maximum of 60-minute accumulated rainfall by XRAIN and actual inundation in each case.

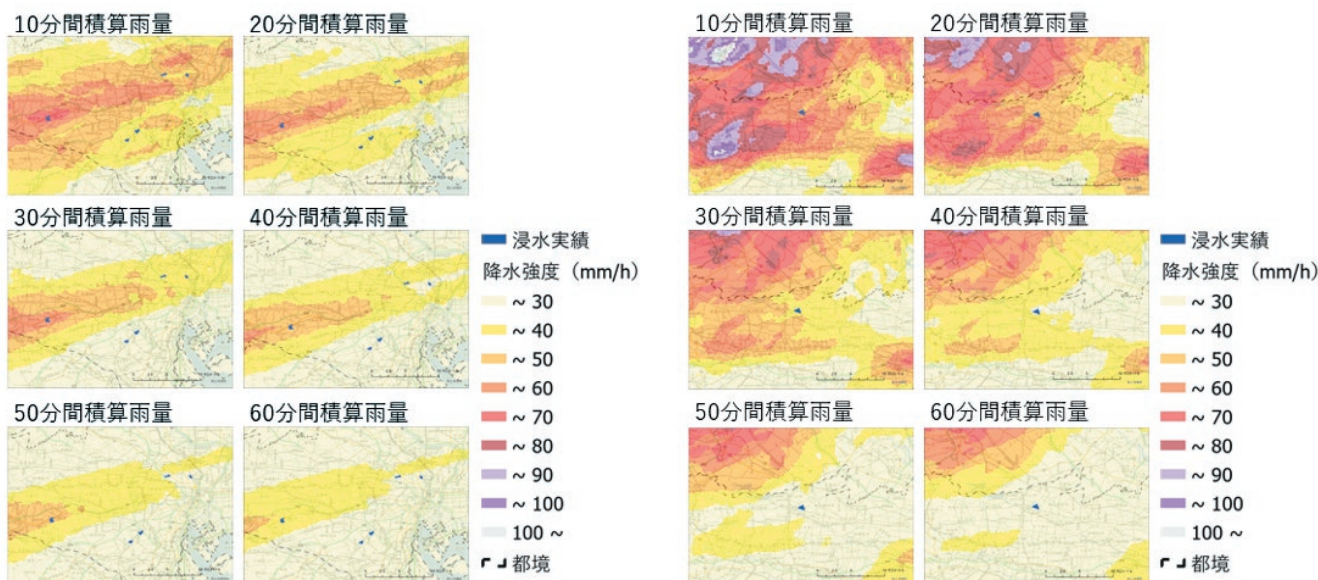


図8 令和3年8月15日の浸水実績とXRAINによる各時間スケールの積算雨量(降水強度換算)の日最大値の水平分布

Fig. 8 Horizontal distribution of daily maximum of accumulated rainfall (converted to precipitation intensity) for each time scale by XRAIN and actual inundation in the case of 15 Aug 2021.

図9 令和4年7月12日の浸水実績とXRAINによる各時間スケールの積算雨量(降水強度換算)の日最大値の水平分布

Fig. 9 Horizontal distribution of daily maximum of accumulated rainfall (converted to precipitation intensity) for each time scale by XRAIN and actual inundation in the case of 12 July 2022.

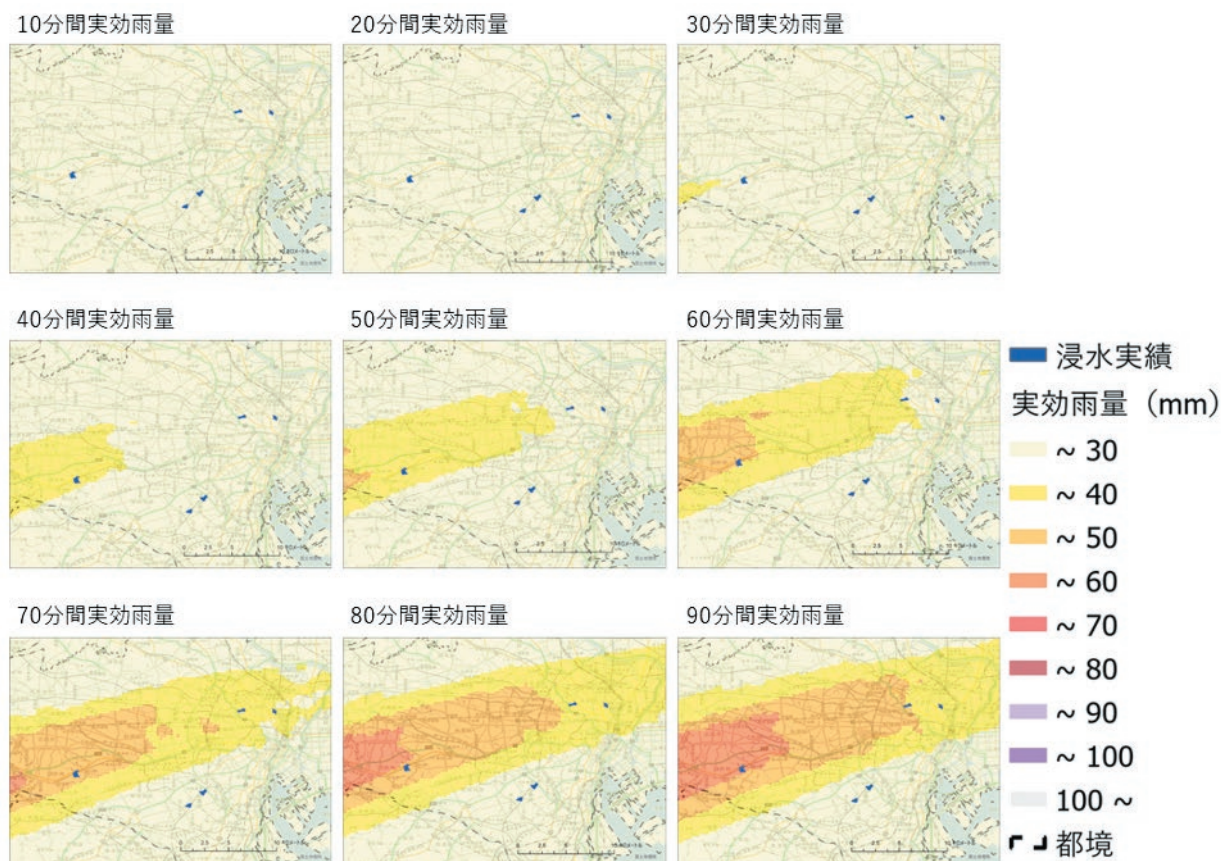


図 10 令和 3 年 8 月 15 日の浸水実績と XRAIN による各半減期の実効雨量の日最大値の水平分布
 Fig. 10 Horizontal distribution of daily maximum of effective rainfall of each half-life by XRAIN and actual inundation in the case of 15 Aug 2021.

4.3.2 浸水実績と XRAIN 実効雨量の水平分布

前述の 2 事例について、浸水実績と各半減期の実効雨量の水平分布を図 10 および図 11 に示している。令和 3 年 8 月 15 日の事例については、半減期が長い実効雨量において強雨域との部分的な一致が見られたが、半減期 10 分間実効雨量等、半減期の短い実効雨量ほど、強雨域の浸水実績との一致も見られない。令和 4 年 7 月 12 日の事例についても、半減期 10 分間実効雨量では浸水実績周辺を含めて 30 mm 以下の範囲が広がっているが、半減期 90 分間実効雨量等の半減期が長い実効雨量ほど、北西部で強雨域が観測されている。しかし、浸水実績における実効雨量は 30 mm 以下と低い値となっており、強雨域との一致は見られなかった。

4.4 浸水実績と XRAIN 雨量の関係

浸水実績と XRAIN 雨量の関係性を定量的に調査するために、浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムを基に、雨量閾値における浸水捕捉率の推移を示すグラフを作成した。以下にその結果を

示す。

4.4.1 積算雨量の浸水捕捉率

図 12 は、XRAIN による積算雨量におけるそれぞれの雨量閾値での浸水捕捉率を示している。これによると、いずれの積算雨量においても捕捉率が 90% を下回る雨量閾値を境目に、極端な捕捉率の低下が確認できる。特に、10 分間積算雨量が捕捉率 90% を下回る雨量閾値を境に、それ以上の時間スケールの積算雨量においても捕捉率の急激な低下が確認できる。捕捉率 90% を下回る積算雨量は 10 分間積算雨量が降水強度で 70 mm h^{-1} 以上、20 分間積算雨量が 60 mm h^{-1} 以上、30 分間積算雨量が 55 mm h^{-1} 以上、40 分間積算雨量が 45 mm h^{-1} 以上、50 分間積算雨量が 40 mm h^{-1} 以上、60 分間積算雨量で 35 mm h^{-1} 以上であった。60 分間積算雨量において捕捉率 90% を下回る雨量閾値は 35 mm h^{-1} となっており、これは図 2 の浸水地点での XRAIN による 60 分間積算雨量分布を表すヒストグラムにおいて、浸水地点数が急増する雨量に対応していることが確認できる。

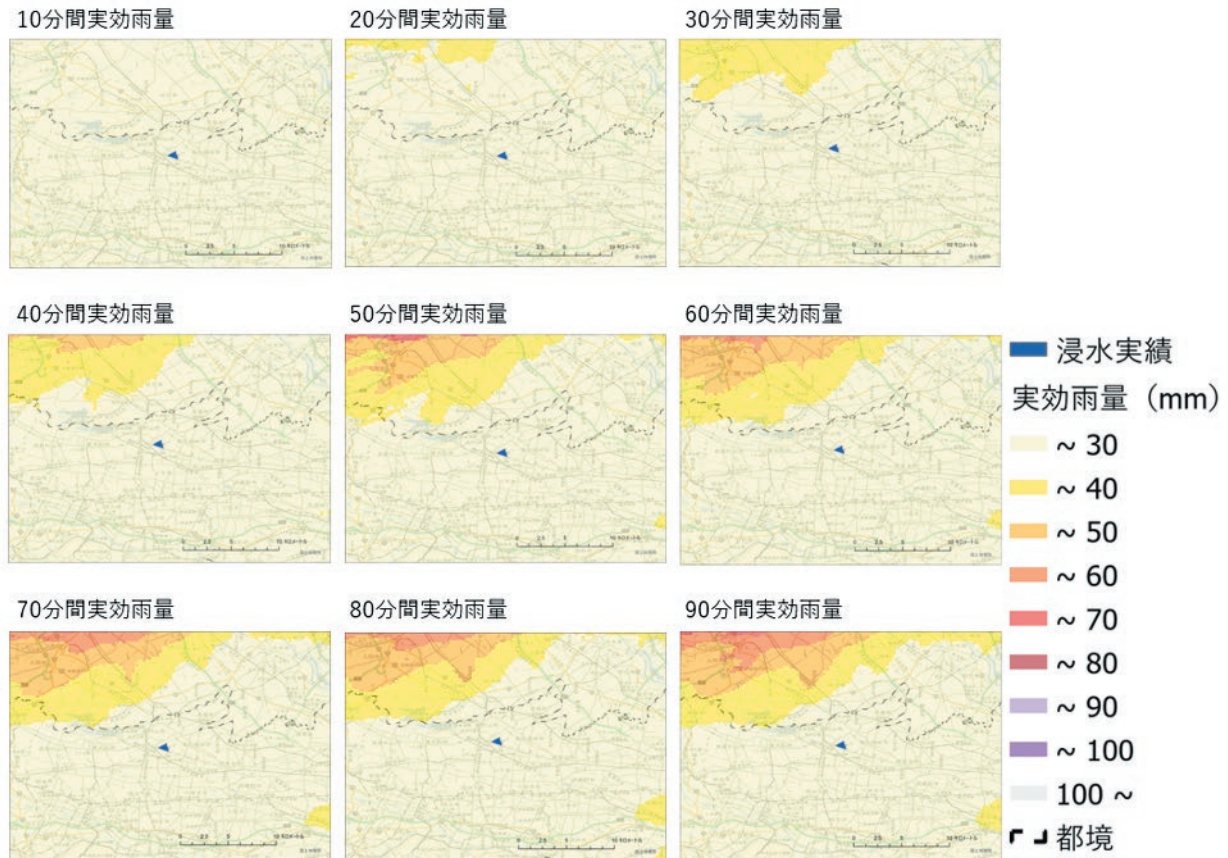


図 11 令和 4 年 7 月 12 日の浸水実績と XRAIN による各半減期の実効雨量の日最大値の水平分布
 Fig. 11 Horizontal distribution of daily maximum of effective rainfall of each half-life by XRAIN and actual inundation in the case of 12 July 2022.

4.4.2 実効雨量の浸水捕捉率

図 13 は、XRAIN による各半減期における実効雨量におけるそれぞれの雨量閾値での浸水捕捉率を示している。これによると、積算雨量と同様に、半減期 10 分間から 60 分間の実効雨量においては、捕捉率が 90% を下回る雨量閾値を境に極端な捕捉率の低下が確認できる。また、半減期が長い実効雨量ほど、捕捉率 90% における雨量閾値の差が小さいことが分かる。捕捉率 90% を下回る実効雨量は半減期 10 分間が 15 mm 以上、半減期 20 分間が 20 mm 以上、半減期 30 分間が 25 mm 以上、半減期 40 分間が 25 mm 以上、半減期 50 分間が 30 mm 以上、半減期 60 分間が 30 mm 以上であった。また、半減期 70 分間～90 分間の実効雨量に関して見ると、捕捉率 80% を下回る雨量閾値を境目に極端な捕捉率の低下が確認できる。各半減期における実効雨量が捕捉率 80% を下回る実効雨量は、半減期 70 分間～90 分間の全てにおいて 40 mm と、ほとんど差はなかった。

5. 考察

浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラム(図 2～図 5)は、基本的に左右対称の正規分布を示しており、これ以上の雨量で内水氾濫が発生するという明確な雨量閾値は認められなかった。比較的弱い降水でも浸水が発生している地点に関しては、高架下や窪地等、浸水しやすい地形的特徴等の外的な要因が影響しているものと考えられる。

時間スケールに注目すると、浸水実績と XRAIN 雨量の日最大値の水平分布(図 8, 図 9)より、短時間の積算雨量ほど浸水地点と降水強度の強い範囲が一致している。特に、浸水地点における XRAIN による 60 分間積算雨量が 30 mm に満たない事例であっても、XRAIN による 10 分間積算雨量の降水強度では 50 mm h^{-1} を超えていた。このことから、より短時間の積算雨量の方が都市における内水氾濫の発生を捉えるのに適しているということが考えられる。これは、尾崎ほか(2015)⁶⁾による、内水氾濫の解析精度を高めるためには雨量が平準化されな

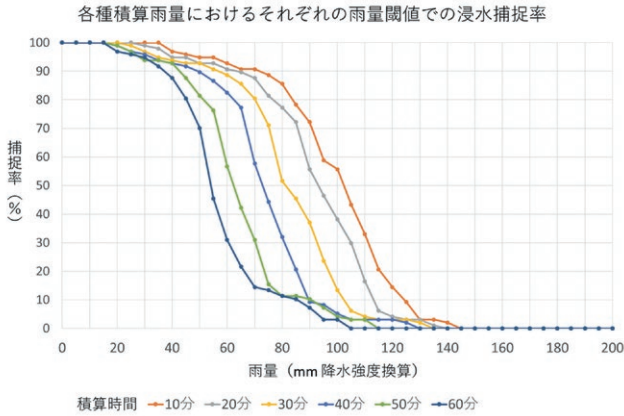


図 12 各時間スケールの積算雨量(降水強度換算)におけるそれぞれの雨量閾値での浸水捕捉率
 Fig. 12 Detection rate of flooding sites at each rainfall threshold for accumulated rainfall (converted to precipitation intensity) for each time scale.

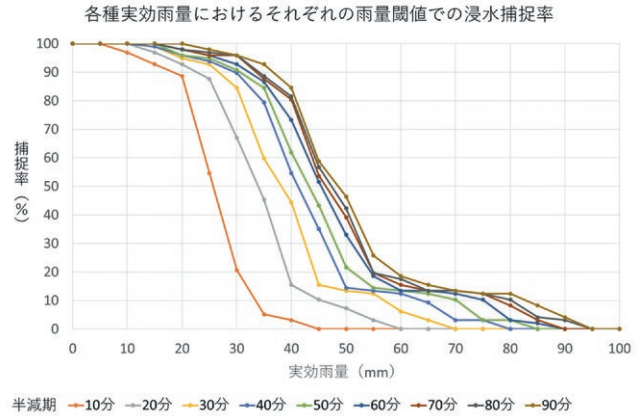


図 13 各半減期の実効雨量におけるそれぞれの雨量閾値での浸水捕捉率
 Fig. 13 Detection rate of flooding sites at each rainfall threshold for each effective rainfall of each half-life.

いように、なるべく短時間の積算雨量を用いた方が良いとする指摘に整合する。加えて、浸水地点での XRAIN による 60 分間積算雨量分布および 60 分間の降水強度に換算した 10 分間積算雨量の分布を表すヒストグラム(図 2, 図 3)を比較すると、ヒストグラムの凸型の形状は 60 分間積算雨量の方の幅が狭くなっており雨量の平準化が現れている一方、10 分間積算雨量の方では幅が広く 70 mm h⁻¹ 以下では浸水地点は少ないがそれを超えると急に浸水地点数が増えることがわかる。

XRAIN による各時間スケールの積算雨量および各半減期の実効雨量におけるそれぞれの雨量閾値での浸水捕捉率(図 12, 図 13)は、積算雨量および大半の実効雨量においては 90% を境に急激な低下が認められた。捕捉率という観点から、内水氾濫による浸水可能性に対する XRAIN 雨量による予測可能性を考察すると、捕捉率 90% における雨量を雨量閾値とすることで内水氾濫の指標となり得ると考えられる。XRAIN による 10 分間積算雨量の降水強度を利用する場合、捕捉率 90% となる閾値は 70 mm h⁻¹ となり、この値はヒストグラム(図 3)で浸水地点数が急増する雨量帯と一致する。今回の解析では、被害がベースとなる浸水実績を用いていることに加え、データの時空間解像度が粗く(日データかつ町丁単位)、期待される意味のある結果が得られない可能性が高いことから、XRAIN 雨量による浸水的中率を算出しないこととした。そのため、解

析対象領域内の気象庁アメダスによる地上観測雨量を用いて、浸水地点で観測された XRAIN 雨量がどれぐらいの頻度で発生するかの検証を行ったところ(図 6)、アメダスによる 10 分間積算雨量の降水強度が浸水捕捉率 90% となる雨量閾値である 70 mm h⁻¹ 以上の出現頻度は、過去 5 年間の夏季において 1 年間・1 地点あたり約 0.9 日の発生頻度であった。そのため、XRAIN による 10 分間積算雨量の降水強度を利用する場合、捕捉率 90% となる 70 mm h⁻¹ を閾値とした場合においても空振り率が高くないことが期待される。

一方で、XRAIN による 10 分間積算雨量の降水強度を 50 mm h⁻¹ とすることで、60 分間積算雨量による解析では見逃されていた浸水地点も捕捉されていた(図 8 および図 9)。そのため、アメダスによる 10 分間積算雨量の降水強度 50 mm h⁻¹ 以上の出現頻度を解析したところ、過去 5 年間の夏季において 1 年間・1 地点あたり 2.4 日の発生頻度であった。このことから、閾値として XRAIN の 10 分間積算雨量の降水強度 50 mm h⁻¹ を用いた場合、空振りの増加はやや懸念されるものの、捕捉率は約 95% に達し、60 分間積算雨量では見逃される浸水地点を捕捉できる可能性が示唆される。一般的に見逃しを減らすと空振りは増える関係にあり、一概にどの閾値が良いか決めることはできないが、内水氾濫に伴う浸水被害を少しでも軽減するという意味では、50 mm h⁻¹ も重要な閾値となり得ると考えられる。

実効雨量と浸水実績の水平分布(図10, 図11)において, 浸水地点と実効雨量の多い領域の一致が見られなかった。地面への雨水の浸透がほとんどない都市部での内水氾濫は, 非常に激しい雨により下水道設備の排水能力を超えたときに短時間で発生する。そのため, 過去に降った雨量に少なからず影響を受ける実効雨量は, 短時間積算雨量と比較して, 地面への雨水の浸透がほとんどない都市における内水氾濫を捉えるには適していない可能性がある。

6. まとめ

本研究では, 都市部における内水氾濫発生の可能性をレーダによる推定雨量を用いて予測することを目的として, 東京23区および多摩地区においてレーダ雨量から算出した積算雨量と実効雨量を用いて, 内水氾濫による浸水実績との検証を行った。また, 様々な時間スケールの積算雨量および半減期の実効雨量と内水氾濫による浸水実績との関係性を調査し, レーダ雨量の積算時間の違いによる内水氾濫発生の捕捉率を検証することで, レーダ雨量を用いた内水氾濫危険度予測の実現可能性についての検討を行った。

これによって得られた結果および考察については, 以下のようにまとめられる。

- (1) 都市部における内水氾濫は, ある一定の雨量以上の領域において発生するものではなく, 地形的特徴等の要因によって東京都の下水道整備基準である時間雨量 50 mm より少ない積算雨量でも内水氾濫が発生し得る。
- (2) より短時間の積算雨量の方が長時間の積算雨量に比べ, 内水氾濫発生を捉えるのに適していると言える。このことは, 浸水実績と積算雨量の水平分布において, 短時間積算雨量の方が浸水実績付近に降水強度の強い範囲が一致しているほか, 浸水地点での XRAIN 雨量分布を表すヒストグラムにおいて雨量が平準化されることなく, ある特定の降水強度まで浸水地点数は少ないが, それを超えると急に浸水地点数が多くなることから示されている。
- (3) 内水氾濫による浸水可能性について, 浸水捕捉率 90% となる XRAIN 雨量を閾値とすることで内水氾濫の指標となり得ると考えられる。10 分間積算雨量を用いて内水氾濫の発生を捕捉率

90% で予測する場合, 60 分換算の降水強度の閾値は 70 mm h^{-1} であった。この際, 気象庁アメダスによる地上観測雨量の解析によって, 過去5年間の夏季において, 10 分間積算雨量の降水強度が 70 mm h^{-1} を超える雨量の出現頻度が1年間・1地点あたり 0.9 日程度であることが明らかとなったことから, 捕捉率 90% を閾値とした場合においても空振り率が高くないことが期待される。

- (4) XRAIN の雨量閾値として 10 分間積算雨量の降水強度 50 mm h^{-1} を用いた場合, 空振りの増加はやや懸念されるものの, 捕捉率は約 95% に達し, 60 分間積算雨量では見逃される浸水地点を捕捉できる可能性が示唆された。一般的に見逃しを減らすと空振りは増える関係にあり, 一概にどの閾値が良いか決めることはできないが, 内水氾濫に伴う浸水被害を少しでも軽減するという意味では, 50 mm h^{-1} も重要な閾値となり得ると考えられる。
- (5) 実効雨量と浸水実績の水平分布において, 浸水地点と実効雨量の多い領域の一致が見られなかった。実効雨量は, 過去に降った雨量に少なからず影響を受けるため, 短時間積算雨量と比較して, 地面への雨水の浸透がほとんどない都市における内水氾濫を捉えるには適していない可能性がある。

今回の解析では, 被害ベースの浸水実績を用いているために, 浸水実績として記録されていない浸水箇所はフォローされていない。また, 浸水実績データは日データかつ町丁単位であるなど, 時空間解像度が粗いデータであった。そのため, XRAIN 雨量による浸水的中率を算出する代わりに捕捉率や空振り率を用いて議論を行った。浸水的中率の算出に向けては, より時空間解像度の細かい浸水実績データを収集する必要があるが, 現状では各自治体の被害報告に依存せざるを得ない。そのような現状においては, 被害ベースの浸水実績と DID (人口集中地区) データを併せて利用することで, 被害ベースの浸水的中率を算出できる可能性があるが, それは今後の課題である。また, 浸水地点の地形的特徴が内水氾濫発生に影響を与える可能性があることから, 土地利用細分メッシュデータ等を用いた解析を行い, 各事例についてより詳細な検証を行う必要がある。

本研究では、XRAIN 雨量による降水強度に換算した 10 分間積算雨量を用いると 70 mm h^{-1} を雨量閾値とすることで 90% 以上の内水氾濫を捕捉できる可能性を示した。この情報は、内水氾濫の発生可能性があるときの緊急車両の通行支援への利用が考えられるほか、地下施設への浸水防止のためのひとつの指標となり得る。

謝辞

本研究を進めるにあたり、国立研究開発法人防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門の平野洪賓先生をはじめ、多くの方々から御助言およびお力添えいただきました。心より感謝申し上げます。また、本論文は、第一著者が当研究所に研修生として派遣されている間に、自由な発想により行った研究を基に作成したものです。当研究所へ派遣し、貴重な機会を与えて頂いた派遣元に感謝致します。また、本研究では、国土交通省が提供する XRAIN データセットを利用しました。またこのデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム (DIAS) の下で、収集・提供されたものです。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ : https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (2023 年 3 月 6 日参照)
- 2) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 自然災害情報室ホームページ : 防災基礎講座. https://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza_kiso/11naisui.html (2023 年 3 月 6 日参照)
- 3) 松下くるみ・三隅良平・前坂剛・岩波越 (2012) : 東京都における内水氾濫被害の要因分析. 防災科学技術研究所研究報告, **80**, 27-46. (info:doi/10.24732/nied.00001221)
- 4) 国土交通省ホームページ : 気候変動を踏まえた都市浸水対策に関する検討会. https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000659.html (2023 年 3 月 6 日参照)
- 5) 東京都下水道局 (2022) : 下水道浸水対策計画 2022. <https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/about/pdf/floodcontrolplan2022.pdf>
- 6) 尾崎 平・石垣泰輔・戸田圭 (2015) : 降雨イベントの積算時間間隔と内水氾濫解析精度に関する考察. 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4 I_1447-I_1452,2015. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/71/4/71_242/_pdf
- 7) 国立研究開発法人防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門ホームページ : <https://sip4dkit-web.bosai.go.jp/rain/effectiverainfall/> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 8) 東京都建設局 : 水害記録_区市町村別水害データ. https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyoku/river/suishin/suigai_kiroku/shisa/shisa.html (2022 年 9 月 20 日参照)
- 9) 狛江市 : 市内浸水確認箇所一覧_狛江市 HP. <https://www.city.komae.tokyo.jp/index.cfm/42,110375,328,2044,html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 10) 小平市 : 小平市浸水履歴図_小平市 HP. <https://www.city.kodaira.tokyo.jp/kurashi/084/084048.html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 11) 世田谷区 : 浸水確認箇所一覧 / 浸水確認箇所図_世田谷区 HP. <https://www.city.setagaya.lg.jp/mokuji/kurashi/005/003/003/d00020100.html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 12) 調布市 : 市内浸水風害箇所一覧_調布市 HP. <https://www.city.chofu.tokyo.jp/www/contents/1400739725005/index.html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 13) 東村山市 : 浸水履歴_東村山市 HP. <https://www.city.higashimurayama.tokyo.jp/kurashi/bosai/bosai/huusuigai/shinnsuireki.html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 14) 板橋区 : 浸水履歴_板橋区 HP. <https://www.city.itabashi.tokyo.jp/bousai/bousai/shinsu/1005716.html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 15) 品川区 : 浸水に関するハザードマップと浸水実績_品川区 HP. <https://www.city.shinagawa.tokyo.jp/PC/bosai/bosai2/taihu/hpg000020939.html> (2023 年 3 月 6 日参照)
- 16) 武蔵野市 : 市内の浸水履歴を知りたい_武蔵野市 HP. https://www.city.musashino.lg.jp/faq/kurashi_tetsuzuki/bosai/1004405.html (2023 年 3 月 6 日参照)
- 17) 文京区 : 文京区浸水履歴_文京区 HP. <https://www.city.bunkyo.lg.jp/bosai/bosai/bousai/Panfu/>

- hazard/sinnsuirireki.html (2023年3月6日参照)
- 18) 目黒区：浸水履歴_目黒区 HP. <https://www.city.meguro.tokyo.jp/kurashi/anken/bosai/type/ooame/shinnsuirireki.html> (2023年3月6日参照)
- 19) 練馬区：浸水履歴_練馬区 HP. <https://www.city.nerima.tokyo.jp/kurashi/bosai/suigai/06614523120170714.html> (2023年3月6日参照)
- 20) 気象庁：過去の天気図. <https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/wxchart/quickmonthly.html> (2023年3月6日参照)
- 21) 政府統計の総合窓口 (e-Stat) : [https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1 &type=2&aggregateUnitForBoundara=A&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&sserveyI=A002005212015&coordsys=2&format=shsha](https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=2&aggregateUnitForBoundara=A&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&sserveyI=A002005212015&coordsys=2&format=shsha) (2023年3月6日参照)
- 22) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2023年3月6日参照)
- (2023年3月8日原稿受付,
2023年4月14日改稿受付,
2023年4月18日原稿受理
2023年6月16日公開)

要 旨

近年、地球温暖化等の影響により、日本各地において局地的大雨の激甚化および高頻度化が進んでおり、これに伴って低内地等の地表面に雨水が貯留する内水氾濫が多発している。東京都では、都市化に伴う雨水の貯留および浸透能力が懸念されており、時間雨量 50～75 mm の降雨に対応できるような下水道整備を推進しているが、毎年のように内水氾濫による浸水が発生している。本研究では、都市部における内水氾濫発生の可能性をレーダによる推定雨量を用いて予測することを目的として、浸水実績を用いてレーダ雨量の検証を行った。60 分間以下の積算雨量および半減期 90 分以下の実効雨量と内水氾濫発生の関係性について調査した結果、10 分という短時間の積算雨量を監視することで、都市における内水氾濫の発生を予測できる可能性が示された。

キーワード：内水氾濫，浸水実績，レーダ雨量，積算雨量，実効雨量