

東京都における内水氾濫被害の要因分析

松下くるみ*・三隅良平*・前坂 剛*・岩波 越*

Study on the Factors Contributing to Inland Floods in Tokyo

Kurumi MATSUSHITA, Ryohei MISUMI, Takeshi MAESAKA, and Koyuru IWANAMI

**Storm, Flood and Landslide Research Unit,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
misumi@bosai.go.jp, maesaka@bosai.go.jp, iwanami@bosai.go.jp*

Abstract

In Tokyo, inland floods occupy about 80 percent of the economic damages caused by floods. Thus, a countermeasure to inland floods is an important issue. In this study, the factors contributing to inland floods in Tokyo are analyzed with the discrimination analysis using the rainfall data derived from X-band multi-parameter radar and the grid data of national land information. The results showed that the most important factor contributing to the occurrence of inland floods in Tokyo is the maximum hourly rainfall. When hourly rainfall exceeds 50 mm, inland floods tend to occur. The area ratio of depressed ground and buildings also contribute to the occurrence of inland floods. On the other hand, gradient of the topography has negative contribution.

Key words: Urban flood, Multi-parameter radar, Qualification Theory Class 2, Local heavy rainfall

1. はじめに

近年、都市化に伴う水田や畑地の宅地化や地表面の舗装化が進み、都市部の土地利用状況および土地被覆状態が変化することで、地下への雨水の貯留・浸透能力が低下している。そのため、局所的な豪雨による都市部の浸水被害が多発する傾向が指摘されている。このような都市部で発生する浸水被害のひとつとして、内水氾濫があげられる。内水氾濫とは、堤防によって守られている堤内地において、雨水の排除不良によって生じる洪水である。この内水氾濫と外水氾濫（河川の溢水等）との被害額の割合を全国と東京都で比較すると、全国では内水氾濫による被害額が 46 % であるのに対し、東京都では 80 % を占めており、堤防等の整備が比較的進んでいる都市部では、内水氾濫が新たな課題であることは明らかである（国土交通省、2004）。しかし、内水氾濫は下

水道等が一定の水位を超えると、短時間で特定の地域が浸水するため、的確なタイミングで住民に避難勧告等を発令することが難しく、被害を抑えるための施策が充分には構築されていないという現状がある。

一方で、近年は局所的な集中豪雨が頻繁に発生しており、これによる内水氾濫の増加が懸念されている。1 時間 100 mm を超える雨の発生回数は、1976 ~ 1985 年では年に平均 2.2 回であったのに対し、1986 ~ 1995 年では平均 2.3 回、1996 ~ 2003 年では平均 4.8 回と増加する傾向を示している（国土交通省、2004）。実際に、2005 年 9 月 4 日に発生した杉並豪雨では、杉並区下井草の観測所において 1 時間に 112 mm の降水量が観測され、床上・床下浸水合わせて 2,512 棟の内水氾濫被害がもたらされた。このような局所的な集中豪雨は、単位時間当たりの

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット

降雨強度が強だけでなく、数時間程度と非常に短い時間スケールで発生するという特徴がある。2008 年 8 月 5 日に豊島区雑司が谷で発生した集中豪雨では、降雨観測開始から約 20 分後には降雨強度 80 mm/h を超えるような豪雨となり、下水道内で作業を行っていた作業員 5 人が急激な増水で流され死亡する事故が発生した(東京都下水道局, 2008)。このような経験から、内水氾濫の発生が降雨の影響を強く受けていることは明らかである。しかし、内水氾濫は雨水の排除不良によって生じるという点から、内水氾濫が発生する地域の土地利用や地形といった土地条件の影響を無視することはできない。内水氾濫被害は、土地条件や降雨量といった局地的諸要因が重なって発生するといわれている(石井・石橋, 1989)。そのため、事前に可能な対策として土地条件を考慮した危険地域の把握を行うことは重要であるといえる。

内水氾濫を扱った研究は以前から行われており、関根・河上(2003)は、東京都新宿駅周辺での浸水被害箇所や地下街での被害に関して、数値解析モデルを用いて予測を行い、新宿駅周辺では標高の低い「ガード下」付近において、現在の下水道網による雨水排除システムが完全に機能しても浸水被害が生じることなどを示した。しかし、下水道のデータを扱える範囲内など、比較的狭域な範囲を対象とした研究が多く、土地条件が大きく変化するような範囲を対象とした内水氾濫被害地域の研究は少ない。また、内水氾濫に対する降雨量や土地条件といった要因の寄与を定量的に評価した研究も少ないのが現状である。こうしたなか、高橋・他(1987)は 5 つの全国一級水系について、雨量や地形分類、非集水域面積率、宅地率、微視的窪み度、巨視的窪み度の要因を用いた数量化理論第Ⅱ類による内水危険度評価を行った。この研究では、どの流域においても十分な精度で内水害発生・非発生が判別可能であり、内水氾濫発生に大きく寄与している要因はどの流域においても雨量と宅地率であるが、その他の要因の寄与度は流域によって異なると述べている。しかし、高橋・他(1987)の研究では、対象領域を一級水系の流域としており、現在内水氾濫が問題視されている東京都を直接扱っているものではない。

雨量については、内水氾濫に大きく寄与する要因であるにも関わらず、従来の研究で用いられた雨量

データは、地上の雨量計や気象庁のレーダから得られたデータを用いたものが大半であった。気象庁のアメダス雨量計ネットワークは平均 17 km の間隔で、観測間隔 10 分の雨量計が設置されたものである。また、神奈川県および東京都により設置されている雨量計は設置間隔 5 km とアメダス雨量計よりも密であるが、観測間隔は 10 分と同様である。国土交通省解析雨量はメッシュ間隔が 1 km と雨量計と比較し細かいため、降雨の細かい空間分布を得られるが、時間間隔は 30 分となっている。先に述べたように、内水氾濫は局地的かつ短時間で発生する豪雨によりもたらされるため、より精度が高く、短時間の雨量情報が必要とされている。

本研究では、東京都において内水氾濫被害をもたらす要因について調査することを目的とし、雨量データや地形・土地利用といった各要因の寄与度を数量化理論第Ⅱ類の判別分析によって求める。また、土地条件の異なる 3 つの地域を解析対象とし、各々の地域で寄与度が高くなる要因の特徴やすべての地域に共通する要因の特徴について調査する。さらに、これらの特徴を先行研究と比較し、整合点や相違点を明らかにする。使用する雨量データは、メッシュ間隔 500 m、観測間隔 5 分と従来の雨量データより密で短時間の X バンドマルチパラメータレーダ(以下、MP レーダ)の観測データを用いる。MP レーダにより得られた雨量情報を使用することで、従来よりも精度の高い雨量情報を含んだ判別分析結果を得ることが期待される。また、東京都の今後の水防活動に役立てる上でも、精度の高い雨量情報を含んだ内水氾濫の要因に関する寄与度を示すことは有効であるといえる。

2. データ

2.1 X バンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定

防災科学技術研究所では、2000 年より 3 cm 波長(X バンド)の水平・垂直の 2 偏波を用いたマルチパラメータレーダ(以下、EBN レーダ)の開発に取り組み(Iwanami *et al.*, 2001)、高精度の面的雨量情報を短時間に取得することが可能となった。EBN レーダは、神奈川県海老名市本郷(35° 24'N, 139° 23'E)に設置されており(図 1)、500 m メッシュ、観測間隔 5 分で半径 80 km の範囲の雨量情報を取得している。

EBN レーダ観測から得られる雨量情報(以下、MP

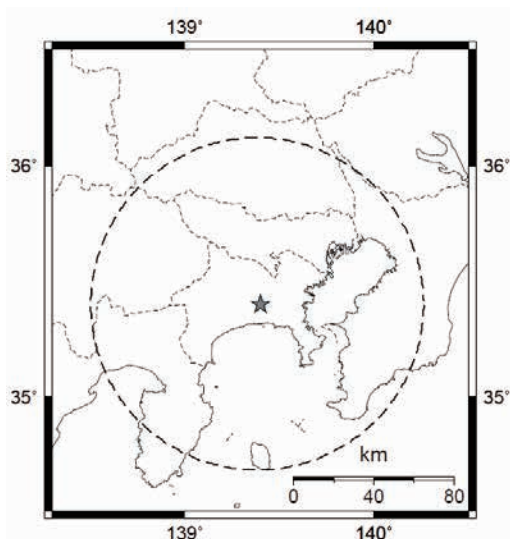


図1 EBN レーダの位置および観測領域
Fig. 1 Location (star) and observation area (circle) of EBN radar.

レーダ雨量)は, Park *et al.* (2005) で示される以下の式を適用することで算出される.

$$R = \begin{cases} 7.07 \times 10^{-3} Z_H^{0.819} & (K_{DP} \leq 0.3 \text{ or } Z_H \leq 35 \text{ dBZ}) \\ 19.6 K_{DP}^{0.83} & (K_{DP} > 0.3) \end{cases} \quad (1)$$

ここで, R は降雨強度 [mm/h], Z_H [$\text{mm}^6 \text{mm}^{-3}$] は水平偏波の反射因子, K_{DP} [$^{\circ} \text{km}^{-1}$] は比偏波間位相差(偏波間位相差 ϕ_{DP} [$^{\circ}$] の単位距離当たりの変化量)である. 式(1)より, 比偏波間位相差が $0.3^{\circ} \text{km}^{-1}$ 以下のとき(弱い雨のとき)は, 反射因子 Z_H から降雨強度 R を推定する R - Z 関係を用い, 比偏波間位相差が $0.3^{\circ} \text{km}^{-1}$ 以上のとき(強い雨のとき)は, 比偏波間位相差 K_{DP} を用いた R - K_{DP} 関係により降雨強度の推定を行う. 弱い雨の場合に R - Z 関係を用いる理由は, 水平偏波と垂直偏波の位相差が小さく, K_{DP} が精度よく求められないためである. 一方で, 強い雨の場合は, R - K_{DP} 関係を用いることでレーダ反射因子 Z_H のように強い降雨による電波の減衰の影響を受けず, より正確な降雨強度を推定できる.

式(1)から算出される降雨強度は方位角, 仰角, レーダからの距離で表わされた極座標系の雨量であるため, Cressman 内挿を用いて, 緯度 0.0045° , 経度 0.0055° の格子点間隔(約 500 m メッシュ)の直交座標系に変換する. Cressman 内挿については, 2.2 節で詳しく述べる. 内挿により 500 m メッシュに変換された雨量データを MP レーダ雨量として使用する.

2.2 Xバンド MP レーダと気象庁レーダの合成雨量

Xバンド MP レーダの雨量情報と気象庁が運用するレーダの雨量情報(以下, JMA レーダ雨量)を合成した雨量データ(以下, MP-JMA 合成雨量)の作成を行う. 合成は, 加藤・他(2009)の方法に従った. MP レーダ雨量は, 2.1 節で得られた降雨強度を用いる. JMA レーダ雨量は, 気象庁の「全国合成レーダエコー強度 GPV」により得られる雨量情報を用いる. この雨量情報を得るための気象庁のレーダは, 波長 5 cm (Cバンド)で 1 km メッシュ, 観測間隔が 10 分(2009 年 7 月以降は 5 分)である.

MP-JMA 合成雨量の作成目的は, MP レーダ雨量で観測できない領域を JMA レーダ雨量により補い, より正確な雨量分布を得ることである. 気象庁レーダが R - Z 関係により雨量推定を行っているのに対し, MP レーダは, R - K_{DP} 関係も含んだ推定を行うことで, 精度のよい推定を行っている. また, MP レーダは Xバンドであるため, JMA レーダの Cバンドよりも波長が短く, 弱い降雨に対しても感度が高く, 正確な降雨推定に有利であるという利点がある. しかし一方で, 非常に強い降雨域の背後では, 降雨減衰を受ける領域(以下, 電波消散領域)が生じるという問題がある.

電波消散領域は, レンジ r までの片道経路積算減衰量を $PIA(r)$ [dB], 各レンジ r での最小受信感度を $dBZ_0(r)$ [dBZ], 降雨強度 R_c に対応する反射因子を dBZ_c [dBZ] とすると, 次式で求められる(岩波・他, 2007).

$$2 \times PIA(r) \geq dBZ_c - dBZ_0(r) \quad (2)$$

ここで, $PIA(r)$ は水平偏波における減衰量 A_H [dBkm^{-1}] の区間 $(0, r)$ の積分値であり, 次式で求められる. なお, α_1, β_1 の値は, 散乱計算より求まる定数である.

$$PIA(r) = \int_0^r A_H dr = \int_0^r \alpha_1 K_{DP}^{\beta_1} dr \quad (3)$$

式(2)の条件を満たす最初のレンジを各方向で見つけることで, いったん検知不可能な領域に達すると, その後方はすべて電波消散領域となる(岩波・他, 2007).

上述した電波消散領域の問題を解消するために, MP レーダ雨量と JMA レーダ雨量の合成雨量である MP-JMA 合成雨量の作成を行う. MP レーダ雨量を

R_{MP} , JMA レーダ雨量を R_{JMA} , MP-JMA 合成雨量を R_{COMP} とし, MP-JMA 合成雨量を以下の式で求める.

$$R_{comp} = \begin{cases} R_{MP}, (R_{MP} > 0) \\ \alpha R_{JMA}, (R_{MP} = 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで, α は補正係数である.

以下, MP-JMA 合成雨量の作成手順を示す. まず, R_{MP} と R_{JMA} の格子間隔を統一するため, R_{MP} を JMA レーダ格子に内挿する. 内挿方法は, Cressman 内挿法を用いた. Cressman 内挿法とは, 距離で重みづけすることで内挿を行う方法である. JMA 格子に内挿された R_{MP} の値を G とすると, 次式により求められる.

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N D_i W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (5)$$

ここで, D_i は MP レーダから得られた地点 i における R_{MP} の値である. また, W_i は Cressman 型の重み関数

$$W_i = \begin{cases} \frac{R_{max}^2 - d_i^2}{R_{max}^2 + d_i^2}, (d_i < R_{max}) \\ 0, (d_i \geq R_{max}) \end{cases} \quad (6)$$

で求められる. d_i は地点 i から JMA 格子の格子点までの距離, R_{max} は影響円の半径である. 一般に, R_{max} は水平格子の格子間隔としている (気象研究所, 1986). そのため, 本研究では JMA レーダの格子間隔 1 km を影響円の半径として用いた.

次に, JMA 格子の R_{MP} と R_{JMA} を用いて, 補正係数 α の算出を行う. 補正係数 α は, JMA 格子の R_{MP} と R_{JMA} の関係から得られる回帰係数の値である. そこで, 同じ時刻における同じ緯度経度メッシュの JMA 格子の R_{MP} と R_{JMA} から, 以下の式により 10 分間隔の回帰係数を算出する.

$$\alpha = r \times \frac{\sigma_M}{\sigma_J} \quad (7)$$

ここで, σ_M , σ_J は R_{MP} と R_{JMA} の標準偏差, r は R_{MP} と R_{JMA} 間の相関係数である. 相関係数 r は次式により得られる.

$$r = \frac{cov}{\sigma_M \sigma_J} \quad (8)$$

ここで, cov は R_{MP} と R_{JMA} の共分散を表している. 式 (7), 式 (8) により対象期間分の 10 分間隔の回帰係数を算出し, 各々の時間帯における補正係数 α として用いる. そして, 式 (4) に従い JMA 格子の R_{MP} と R_{JMA} を合成した MP-JMA 合成雨量 R_{comp} を算出する.

上記の手順で算出された MP-JMA 合成雨量についてアメダス雨量計による精度検証を実施後, 修正を行った. 東京都における下水道の計画雨量が 1 時間積算雨量を用いているなど, 防災対策等に利用される雨量は 1 時間積算雨量である. そのため, 今回の精度検証には, 1 時間積算雨量の値を用いた. 検証には合計 15 地点のアメダス雨量計を使用した (図 2).

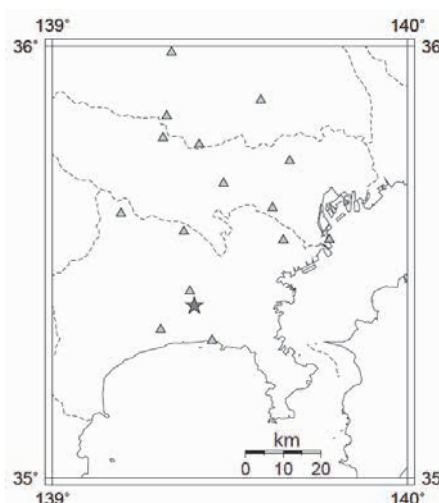


図 2 使用したアメダス雨量計の場所
Fig. 2 Location of AMeDAS rain gauges.

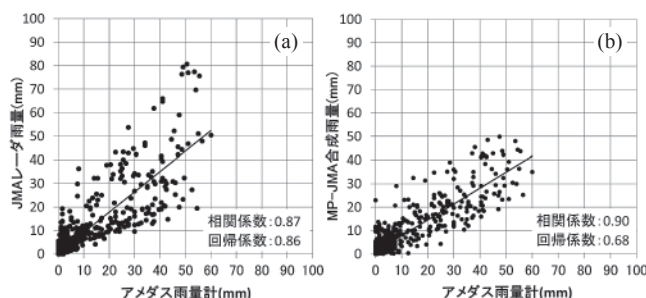


図 3 アメダス雨量計を用いた (a) JMA レーダ雨量および (b) MP-JMA 合成雨量の精度検証結果. データは 2005 年 9 月 4 日 13 時から 5 日 3 時のものを使用した.

Fig. 3 Scatter plots of hourly rainfall derived from AMeDAS rain gauges versus (a) JMA radar and (b) MP-JMA composite rainfall. Data are obtained from 13 JST on 4 to 3 JST on 5 September 2005.

アメダス雨量計を用いた、JMA レーダ雨量と MP-JMA 合成雨量の精度検証結果を図 3 に示す。JMA レーダ雨量と MP-JMA 合成雨量の検証結果を比較すると、相関係数に関しては、MP-JMA 合成雨量の方が JMA レーダ雨量よりも高くなっていることから、合成によりばらつきが減少し、アメダス雨量計とのパターンの類似性が向上したといえる。一方、回帰係数に関しては、JMA レーダ雨量、MP-JMA 合成雨量ともに、回帰係数が 1.0 以下となり、アメダス雨量計に対して過小評価している傾向にある。特に、MP-JMA 合成雨量に関しては、ばらつきが少なく、アメダス雨量計と類似性の高い降雨分布となっているが、大きく過小評価する結果となった。

これを解消するため、アメダス雨量計の値に基づいて、回帰係数が 1.0 となるよう MP-JMA 合成雨量の修正を行った。修正係数を 1.41 として修正を行った MP-JMA 修正合成雨量とアメダス雨量計との比較を図 4 に示す。本研究では 2005 年の事例については、修正後の MP-JMA 合成雨量を解析に用いる。この MP-JMA 合成雨量の格子間隔は 1 km、時間間隔 10 分である。MP レーダによる降雨推定手法が高堀・他(2009)によって改善され、加藤・他(2009)の方法で MP-JMA 合成雨量が 500 m メッシュに整備された 2008 年以降の事例では、この修正係数を用いていない。2005 年の事例と 2008 年以降の事例で格子間隔を統一するため、合成および修正を行った 2005 年の MP-JMA 合成雨量を 500 m 間隔で解析に用いた。

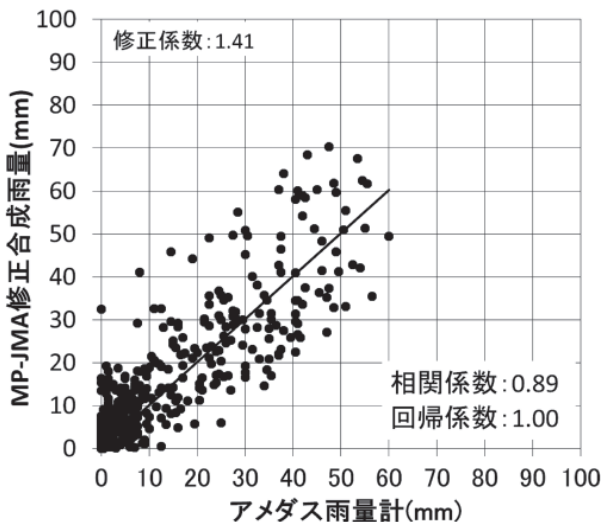


図 4 修正された MP-JMA 合成雨量とアメダス雨量計の比較
Fig. 4 Comparison between corrected MP-JMA composite rainfall and raingauge data.

2.3 内水氾濫被害のデータ

東京都建設局では、都内で過去に発生した水害被害の状況を「過去の水害記録」としてとりまとめている。その中に、水害区域面積 0.1 ha 以上もしくは被害建物棟数が 10 棟以上となる水害の範囲を示した「水害による浸水図」が年度ごとにまとめられている。本研究では、この水害による浸水図を MP レーダの格子間隔 (500 m) (以下、レーダ格子) で区切り、事例ごとに各メッシュに含まれる内水氾濫被害を抽出した。ここでは、河川に隣接していない箇所が発生している浸水被害を内水氾濫と判断した。また、場所によりメッシュ内に占める内水氾濫被害の規模は異なるが、本研究では被害規模は考慮せず、メッシュ内における内水氾濫被害の発生・非発生のみで判断を行った。抽出した内水氾濫被害をレーダ格子でメッシュデータ化し、解析に用いた。

2.4 土地利用・標高データ

本研究では、内水氾濫被害をもたらす要因として、降水量の他に宅地率・平均勾配・窪地率・道路密度の 4 つの土地条件を検討する。宅地率は、国土数値情報「土地利用細分メッシュデータ」(約 100 m メッシュ) に基づき、土地利用分類のうち建物用地に該当するメッシュの占める面積割合をレーダ格子ごとに算出した値である。平均勾配は、「数値地図 50 m メッシュ標高データ」を用いて、東西および南北方向の隣り合う点との勾配を算出し、その最大値をレーダ格子内で平均化した値である。窪地率は「数値地図情報 50 m メッシュ標高データ」で、東西および南北方向の隣り合う点との標高差を算出し、周囲 4 点よりも低くなっている (窪んでいる) メッシュの面積割合をレーダ格子ごとに算出した。

その他に、内水氾濫被害に関係があると考えられるポンプ場の位置や排水路の敷設状況を示すデータの使用が望まれる。しかし、このようなデータの広域での取得は難しいのが現状である。そこで、本研究では、多くの下水道管やマンホールが道路下に埋設されていることに注目し、排水施設の分布を道路密度で代替して用いることとした。道路密度は、国土数値情報「道路密度・道路延長メッシュデータ」を用いて、幅員 2.5 m 以上の道路の交差点数をレーダ格子ごとに示した値とした。

これら 5 つの被害要因が内水氾濫の発生と関係があるのか調査を行うため、試験的に 2005 年 9 月 4

日に東京都杉並区周辺で内水氾濫被害をもたらした杉並豪雨に対して t 検定を行い、各被害要因の有意性を評価した。t 検定では、有意水準を 5% とし、5 つの各被害要因について内水氾濫が発生したメッシュ群と非発生メッシュ群の平均値に有意な差があるのか調査を行った。検定の結果、全ての要因に関して、内水氾濫被害が発生したメッシュと非発生であったメッシュ間に有意な差があるという結果が得られた。

表 1 各被害要因間の相関係数
Table 1 Correlation coefficient between factors.

	降雨量			
平均勾配	0.196	平均勾配		
宅地率	0.077	-0.149	宅地率	
窪地率	0.057	0.198	0.166	窪地率
道路密度	-0.106	-0.234	0.720	0.139

また、判別分析を行うにあたり、各被害要因は独立であることが望ましい。そこで各被害要因間の相関係数を算出したところ表 1 の結果が得られた。大部分は相関係数が 0.2 以下と低い値であるが、宅地率と道路密度間の相関係数は 0.72 と高い値を示した。ここで、相関係数の算出に使用した標本数は 600 個と相関の有意性を判定する上で十分な数であるため、相関係数が 0.7 以上の宅地率と道路密度間には強い相関があるといえる。そこで、本研究では宅地率のみ被害要因として用いることとした。その他の要因に関しては、相関係数 0.2 以下とほとんど相関がないといえる関係であるため、独立した被害要因として使用可能であると判断した。

3. 解析方法

3.1 数量化理論第 II 類

本研究では、内水氾濫被害をもたらす被害要因の

寄与を調査するため、数量化理論第 II 類による判別分析を用いて解析を行った。数量化理論第 II 類とは、質的データを基準に各要因の寄与を数量的に評価する手法である。ここで質的なデータとは、いくつかの要因(アイテム)について、その要因の取り得る値が定性的な値(カテゴリー)をもつデータのことである(佐藤, 2009)。つまり数量化理論第 II 類では、各要因のカテゴリー(以下、アイテム・カテゴリー)に適切な値を割り当てることによって、判別分析に関する各要因の寄与を数量的に評価することが可能となる。

本研究では、2.4 節で選定した 4 つの被害要因(最大 1 時間雨量・宅地率・平均勾配・窪地率)ごとのカテゴリーの標本数(メッシュ数)が概ね等しくなるようにカテゴリーの分類を行った。その結果、最大 1 時間雨量は 5 つ、宅地率は 3 つ、平均勾配は 4 つ、窪地率は 4 つのカテゴリーに分類された。これらのカテゴリーにはそれぞれウエイト(以下、カテゴリーウエイト)が与えられる。カテゴリーウエイトは、各アイテムカテゴリーの寄与度を表す値となっており、数量化理論第 II 類では、最終的にこのカテゴリーウエイトを求めることで、各要因の寄与を評価する。以下、カテゴリーウエイトの算出過程を示す。

まず、各々のアイテムカテゴリーについて、カテゴリーウエイトを表 2 のように仮定し、それらを $a_1, a_2, \dots, d_3, d_4$ と表わす。これらのアイテムカテゴリーのうち、各メッシュにおいて該当するカテゴリーウエイトを足し合わせた値をサンプルスコアと呼び、全てのメッシュについて算出を行う。このとき、2.3 節の作業で内水氾濫非発生と分類されたメッシュは非発生群に、内水氾濫発生と分類されたメッシュは発生群に分類し、群分けを行う。この群分けにより、各群内でのサンプルスコアが互いに近い値をとり、異なる群同士は出来る限り離れた値を取ることで、各群の判別が行われる。

表 2 各アイテムカテゴリーとカテゴリーウエイト
Table 2 Item categories and category weights.

被害要因	最大1時間雨量(mm)					平均勾配(%)				宅地率(%)			窪地率(%)			
カテゴリー	0-30	30-40	40-50	50-60	60-	0-2	2-4	4-10	10-	0-50	50-80	80-100	0-30	30-40	40-50	50-100
ウエイト	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	b_4	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3	d_4

そこで、発生群と非発生群の2群が遠ざかるようなウエイトを決定するために、全サンプルスコアの分散(全分散)と、非発生群と発生群の間のサンプルスコアの群間分散の比で表わされる相関比 η^2 を最大化するようにカテゴリウエイトの値を求める。相関比 η^2 は、2群の離れ具合の尺度であり、次式で与えられる。

$$\eta^2 = \frac{S_B}{S_T} \quad (9)$$

全分散 S_T は、次式で求められる。

$$S_T = (z_1 - \bar{z})^2 + (z_2 - \bar{z})^2 + \dots + (z_n - \bar{z})^2 \quad (10)$$

n は標本数(メッシュ数), z_1, z_2, \dots, z_n は各メッシュのサンプルスコア, \bar{z} はサンプルスコアの平均値である。ここで、非発生群を P , 発生群を Q と置くと、群間分散 S_B は、

$$S_B = n_p(\bar{z}_p - \bar{z})^2 + n_q(\bar{z}_q - \bar{z})^2 \quad (11)$$

で求められる。 n_p, n_q は各々の群の標本数, \bar{z}_p, \bar{z}_q は各々の群のサンプルスコアの平均値である。式(10)および式(11)により得られた値を式(9)に代入することで、相関比 η^2 はカテゴリウエイトの関数として表わすことが可能となる。本研究では、Excel アドインの「ソルバー」機能を使用し、相関比 η^2 が最大値となるようなカテゴリウエイトの算出を行った。

数量化理論第Ⅱ類による判別分析結果の精度は、判別の中率と適中率、捕捉率により表わされる。判別の中率とは、判別分析による推定と実際の内水氾濫被害の一致率を示したものである。また、適中率とは、推定した内水氾濫発生メッシュ数のうち実際に内水氾濫が発生したメッシュ数の割合を表し、捕捉率は、実際に発生した内水氾濫のうち推定が一致したメッシュ数の割合を表したものである。

3.2 解析事例

本研究では、東京都において過去に内水氾濫被害が発生した地域の中から、異なる土地条件の3事例を選定し、土地条件の相違による内水氾濫被害の発生要因の違いや各要因の寄与の違いを調査した。解析を行う事例は、2005年9月4日に東京都杉並区周辺で内水氾濫被害をもたらした「杉並豪雨」、2008年8月5日に東京都豊島区周辺で内水氾濫被害をも

たらした「豊島豪雨」、2008年8月28日に東京都八王子市周辺で内水氾濫被害をもたらした「八王子豪雨」の3つである。これらの事例は、EBNレーダによる観測が開始された2003年以降に東京都内で浸水被害をもたらした豪雨のうち、内水氾濫を原因とする浸水被害が200棟以上発生しているものの中から選定した。浸水被害棟数は、東京都建設局の「過去の水害記録」に示される一般資産(個人・法人が所有する資産)の被害棟数を用いている。

2005年9月4日の杉並豪雨は、内水被害棟数が2512棟と2000年以降最も甚大な内水氾濫被害をもたらした豪雨であることから、解析事例として選定した。2008年8月5日の豊島豪雨は、MP-JMA合成雨量の雨量データが整備された2008年以降に発生した豪雨であり、被害発生地域が都心部に位置し、発生した浸水被害の発生原因の全てが内水氾濫であるという典型的な都市型水害であったことから解析事例として選定した。また、この豪雨では下水道管内で作業を行っていた作業員が急な増水により流されて死亡するという事故も発生している。2008年8月28日の八王子豪雨は、内水被害棟数が258棟と2008年以降に報告された内水氾濫被害棟数の中でも2番目に多く、他の2事例と被害発生地域が異なっていることから、土地条件の違いによる評価を行う上で有効であると考え、選定を行った。

選定した3つの事例の解析範囲を図5に示す。また、土地条件の違いを比較するため、宅地率と標高について、各事例の解析対象範囲内における平均値

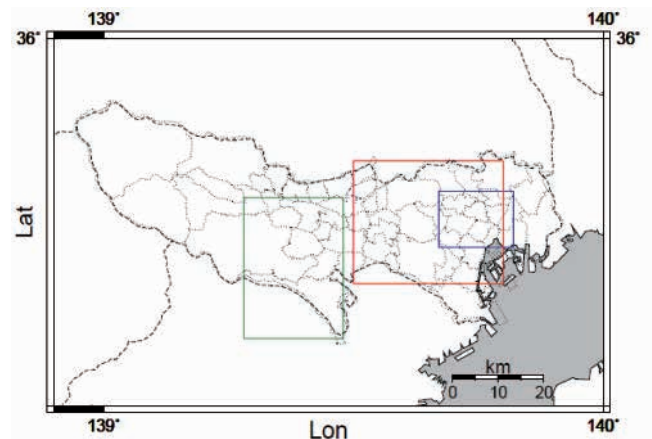


図5 3事例の対象領域。青枠が「都心部」、赤枠が「都心縁辺部」、緑枠が「郊外」を示す。

Fig. 5 Domains of “metropolitan area” (blue), “intermediate area” (red) and “rural area” (green).

を表 3 に示す。宅地率と標高の関係から、3 事例の中で最も宅地率が高く、最も標高が低い地域を「都心部」、反対に最も宅地率が低く、最も標高が高い地域を「郊外」、宅地率・標高ともに両者の中間に位置する地域を「都心縁辺部」と呼ぶことにする。豊島豪雨は都心部、杉並豪雨は都心縁辺部、八王子豪雨は郊外を代表する内水氾濫被害の発生事例として 3 事例の解析を行った。

表 3 3 事例の平均宅地率と平均標高
Table 3 Averaged rate of building area and averaged elevation in the domains.

対象事例	杉並豪雨	豊島豪雨	八王子豪雨
平均宅地率	71.8%	81.7%	51.3%
平均標高	30.8 m	16.6 m	113.3 m
土地分類	都心縁辺部	都心部	郊外

4. 結果

4.1 2005 年 9 月 4 日杉並豪雨

4.1.1 概要

杉並豪雨は、2005 年 9 月 4 日から 5 日未明にかけて東京都杉並区および中野区周辺に内水氾濫被害をもたらした豪雨である。杉並豪雨発生前後の 9 月 4 日 9 時と 5 日 9 時の天気図を図 6 に示す。この豪雨は、台風 14 号から秋雨前線に暖かく湿った空気が流れ込み、大気の状態が不安定となり、関東南部で雨雲が次々と発達したため、東京都および埼玉県で局地的に 1 時間に 100 mm を越える猛烈な雨をもたらした。中でも、杉並区下井草の観測所では 1 時間雨量 112 mm (9 月 4 日 21:50) が観測された。東京都における杉並豪雨による浸水被害は、床下浸水 2,453 棟、床上浸水 3,374 棟、浸水面積 171.6 ha であった。このうち内水氾濫により発生した浸水被害は、床下浸水 1,084 棟、床上浸水 1,428 棟、浸水面積 47.63 ha であった(東京都建設局, 2007)。

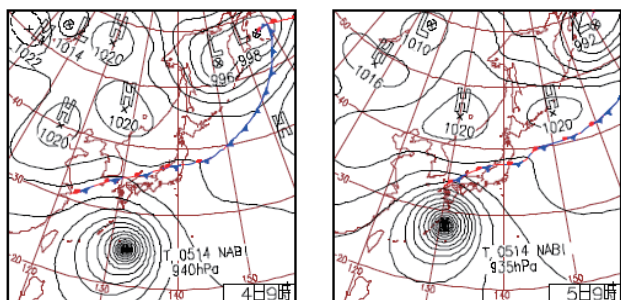


図 6 2005 年 9 月 4 日と 5 日 9 時の天気図 (気象庁)
Fig. 6 Weather charts at 9 JST on 4 and 5 September 2005 (Japan Meteorological Agency).

4.1.2 土地利用・地形・降雨の特徴

杉並豪雨の対象地域 (都心縁辺部) の土地利用の面積割合を図 7 に示す。土地利用の約 70% が「建物用地」であり、この領域の大部分が住宅地もしくは市街地等で建物が密集している地域である。そこで、対象地域内のレーダ格子ごとの建物用地の割合を算出し、宅地率として表わすと図 8 のような分布となる。杉並区、中野区、豊島区、新宿区、文京区などは、宅地率が 80% 以上であり、その周辺地域もほとんどの地域が宅地率 50% 以上となっている。すなわちこの対象地域では、本事例で内水氾濫被害が発生した杉並区、中野区を中心として宅地率が高い地域が広がっている。

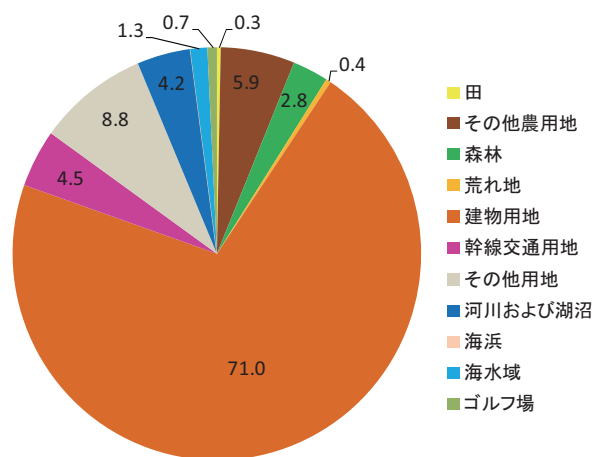


図 7 杉並豪雨対象領域 (都心縁辺部) における土地利用の面積割合

Fig. 7 Percentages of land use in the “intermediate area”.

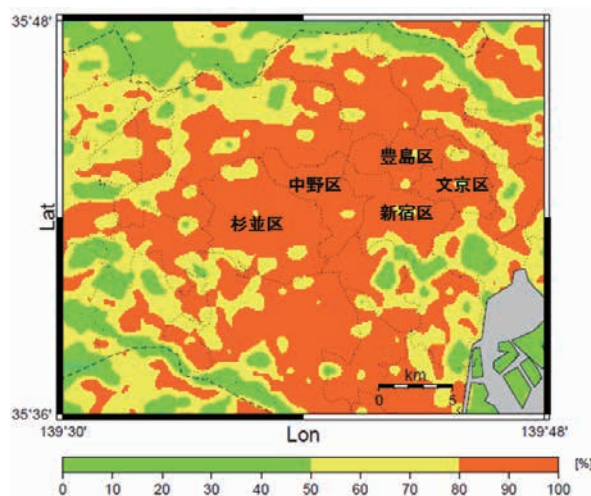


図 8 杉並豪雨対象領域 (都心縁辺部) の宅地率の分布
Fig. 8 Distribution of area rate of buildings site in the “intermediate area”.

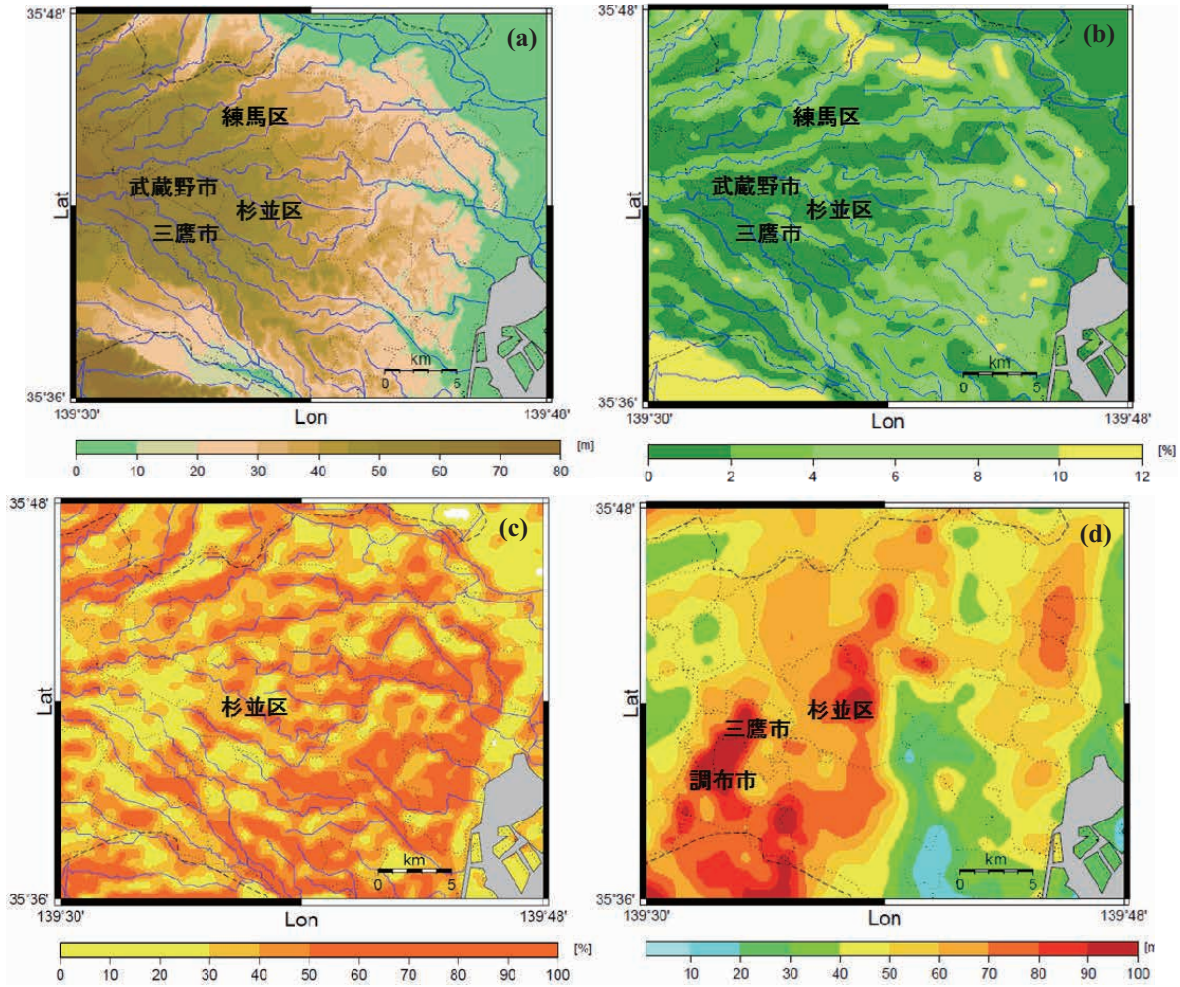


図9 杉並豪雨対象領域(都市縁辺部)の(a)標高, (b)勾配, (c)窪地率, (d)最大1時間雨量。
 Fig. 9 (a) Elevation, (b) gradient of topography, (c) area ratio of depressed ground and (d) maximum hourly rainfall in the “intermediate area”.

対象地域の地形について、標高、平均勾配の点から特徴を述べる。対象地域の標高は、0 m から 132 m であり、西に向かうにつれ標高が高くなる地形となっている(図9(a))。また、平均勾配は図9(b)に示すような分布となっている。東京都東部の標高 10 m 以下の地域では、平均勾配も低く、低地が広がっている地形である。また、東京都中部の三鷹市、武蔵野市、杉並区、練馬区などの標高が 50 m 以上の地域でも平均勾配が緩く、台地地形が広がっている。そのため、この低地から台地に向かう地域では、平均勾配が 4 ~ 8 % と比較的勾配がある地形となっている。また、メッシュ内の窪地の割合を示した窪地率の分布を図9(c)に示す。低地、台地に関係なく河川の周辺に窪地率が高い地域が分布している。

本事例で使用する降雨の対象期間は、9月4日13時から5日3時までである。この期間内でもたらされた最大の1時間雨量をプロットした図が図9(d)である。この対象領域内においてMP-JMA雨量より得られた最大1時間雨量の最大は126.5 mm、最小は13.4 mmであった。また杉並区、三鷹市、調布市などでは、最大1時間雨量100 mmを越える降雨が観測され、その周囲でも70 mmを越えるような降雨となっている。しかし、杉並区内で100 mm以上の降雨が観測された地点から南東方向へ5 kmほど離れた地点では最大でも1時間30 mm以下の降雨した観測されていない。このことから、杉並豪雨は杉並区などを中心とした局地的な豪雨であったといえる。

4.1.3 判別分析の結果

数量化理論第Ⅱ類による判別分析から得られた主な結果を表 4 (a) に、カテゴリウエイトの分布を図 10 に示す。この事例における判別の中率は 63.7% であった。また推定した内水氾濫発生メッシュ数のうち実際に内水氾濫が発生したメッシュ数の割合を表す適中率は 11.1%，実際に発生した内水氾濫のうち推定が一致したメッシュ数の割合を表す捕捉率は、72.1% であった。

表 4 各事例における判別分析結果
Table 4 Results of the discrimination analysis.

	(a)	(b)	(c)
対象事例	杉並豪雨	豊島豪雨	八王子豪雨
判別的中率	63.7%	87.9%	65.9%
適中率	11.1%	29.2%	9.8%
捕捉率	72.1%	83.9%	65.8%

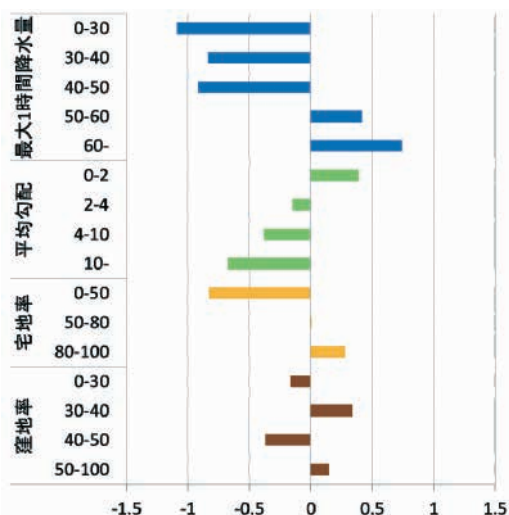


図 10 杉並豪雨対象領域(都心縁辺部)のカテゴリウエイト

Fig. 10 Category weights of the inland flood in the "intermediate area".

カテゴリウエイトは、各々のアイテムカテゴリの寄与を表した数値であり、絶対値が大きいほど内水氾濫発生・非発生への寄与が大きいことを示す。図中では、カテゴリウエイトの値が正ならば内水氾濫発生側へ寄与し、値が負であれば内水氾濫非発生側へ寄与していることを表す。杉並豪雨事例では、内水氾濫発生側に寄与しているカテゴリは、最大 1 時間雨量 50 mm 以上のカテゴリ、平均勾配 2% 未満のカテゴリ、宅地率 50% 以上のカテゴリ、窪地率 30~40% および 50~100% のカテゴリである。一方、内水氾濫非発生側に寄与し

ているカテゴリは、最大 1 時間雨量 50 mm 未満のカテゴリ、平均勾配 2% 以上のカテゴリ、宅地率 50% 未満のカテゴリ、窪地率 30% 未満および 40~50% のカテゴリである。これらのカテゴリウエイトの結果から、最大 1 時間雨量に関しては 50 mm が境界となり、50 mm 未満の降雨ならば内水氾濫は発生しにくい、50 mm を超える降雨になると内水氾濫が発生する危険性があるという結果となった。平均勾配は、2% を境界とし、2% 未満の勾配が緩い地域では内水氾濫被害が発生しやすく、2% 以上の比較的急な傾斜を有する地域では発生しにくい傾向にあるという結果が得られた。宅地率については、50% 未満の地域では、内水氾濫被害が発生しにくい、50% 以上の地域では内水氾濫が発生する傾向にあり、特に、80% を超えるような住宅地・市街地が密集した地域では内水氾濫被害が発生しやすいという結果が得られた。窪地率については、30% 未満の窪地率の低い地域では内水氾濫が発生しにくい、50% を超えるような窪地率が高い地域では内水氾濫が発生しやすい傾向にある。しかし、30~50% の地域では、内水氾濫の発生・非発生どちらの可能性もあるという結果が得られた。

次に、各被害要因の寄与を重要度という指標を用いて示す。重要度とは、各被害要因のカテゴリウエイトの最大値と最小値の差(レンジ)がそれらの合計に占める割合で表される値である。この重要度が大きい要因ほど、内水氾濫発生・非発生を判断する際に重要な要因であることを表す。杉並豪雨における各被害要因の重要度を表 5(a) に示す。杉並豪雨の事例では、最大 1 時間雨量の重要度が 39% と最も高く、次いで 24% の宅地率、23% の平均勾配、15% の窪地率の順となっている。このことから、杉並豪雨事例では、最大 1 時間雨量の要因の寄与が最も大きい、各要因間の重要度の差が比較的小ないため、全ての被害要因が判別結果に寄与しているという結果が得られた。

表 5 各事例における被害要因の重要度
Table 5 Contribution of factors.

	(a)	(b)	(c)
対象事例	杉並豪雨	豊島豪雨	八王子豪雨
最大 1 時間雨量	39%	80%	63%
平均勾配	23%	2%	16%
宅地率	24%	2%	5%
窪地率	15%	16%	16%

4.2 2008年8月5日豊島豪雨

4.2.1 概要

豊島豪雨は、2008年8月5日に東京都豊島区および新宿区周辺で内水氾濫被害をもたらした豪雨である。この豪雨が発生した8月5日9時の天気図を図11に示す。この豪雨は、8月4日から5日にかけて、中国地方から東北地方に停滞する前線が関東地方にゆっくり南下することで、関東甲信越地方に大雨をもたらした(気象庁, 2008a)。この大雨により、東京都では東京都千代田区東京のアメダス雨量計では1時間雨量59.5 mm(8月5日15:17)が観測された。これは、全国のアメダス雨量計観測所のうち、この前線の影響により観測された降水量の中で15番目に多い1時間雨量であった。東京都における豊島豪雨による浸水被害は、床下浸水が69棟、床上浸水が142棟、浸水面積が4.23 haである(東京都建設局, 2010a)。豊島豪雨により発生した浸水被害の原因は内水氾濫のみである。また、豊島豪雨では豊島区雑司ヶ谷において、雑司ヶ谷幹線構築工事を行っていた作業員5人が急な増水により下水道管内で流され、死亡する事故が発生している。

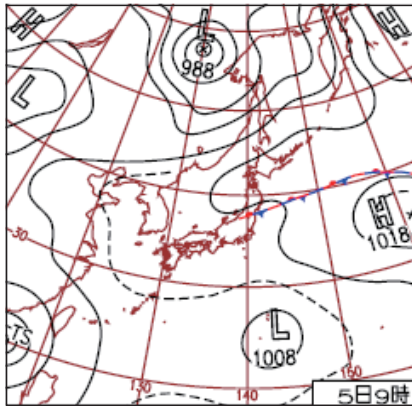


図11 2008年8月5日9時の天気図(気象庁)
Fig. 11 The weather chart at 9 JST on 5 August 2008 (Japan Meteorological Agency).

4.2.2 土地利用・地形・降雨の特徴

豊島豪雨の対象地域の土地利用の面積割合を図12に示す。土地利用の約80%が「建物用地」であり、この領域の大部分が住宅地もしくは市街地等で建物が密集している地域であるといえる。また、その他の土地利用は「幹線交通用地」と「その他の用地」が15.4%を占めている。幹線交通用地とは、道路・鉄

道・操車場などで面的に捉えられるものを表し、その他の用地は、運動競技場、空港、競馬場・野球場・学校港湾地区・人工造成地の空地等を表している。この対象地域では、これら3つの土地分類が96.7%を占め、降雨時に雨水を浸透させるような田や畑・森林といった土地利用はほとんど見られない。対象領域の宅地率の分布を図13に示す。大部分の地域は宅地率が80%以上を示している。ここで、図中の南に見られる宅地率50%未満の3つの地域は、右から皇居・新宿御苑・明治神宮である。また、隅田川や神田川といった一級河川の付近では、大型の河川敷が設けてあることから、これらの近くでは、宅地率が低くなっている傾向がある。対象地域の標高は、0 mから41 mであり、低地から台地に向か

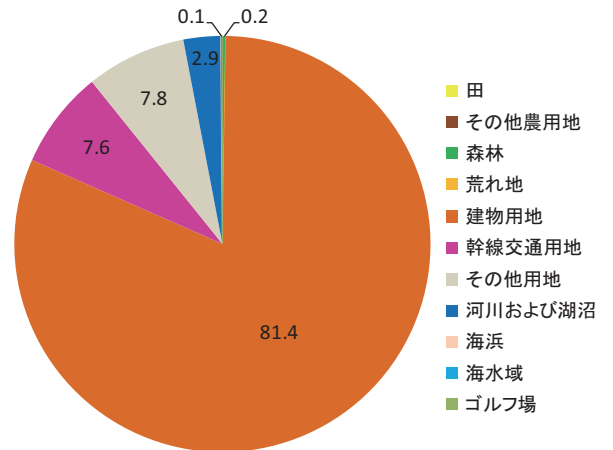


図12 豊島豪雨対象領域(都心部)における土地利用の面積割合
Fig. 12 Area ratio of the land use in the “urban area”.

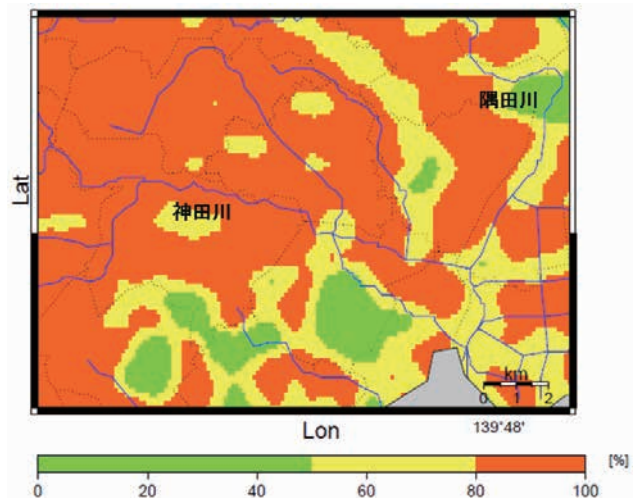


図13 豊島豪雨対象領域(都心部)の宅地率
Fig. 13 Area ratio of the buildings in the “urban area”.

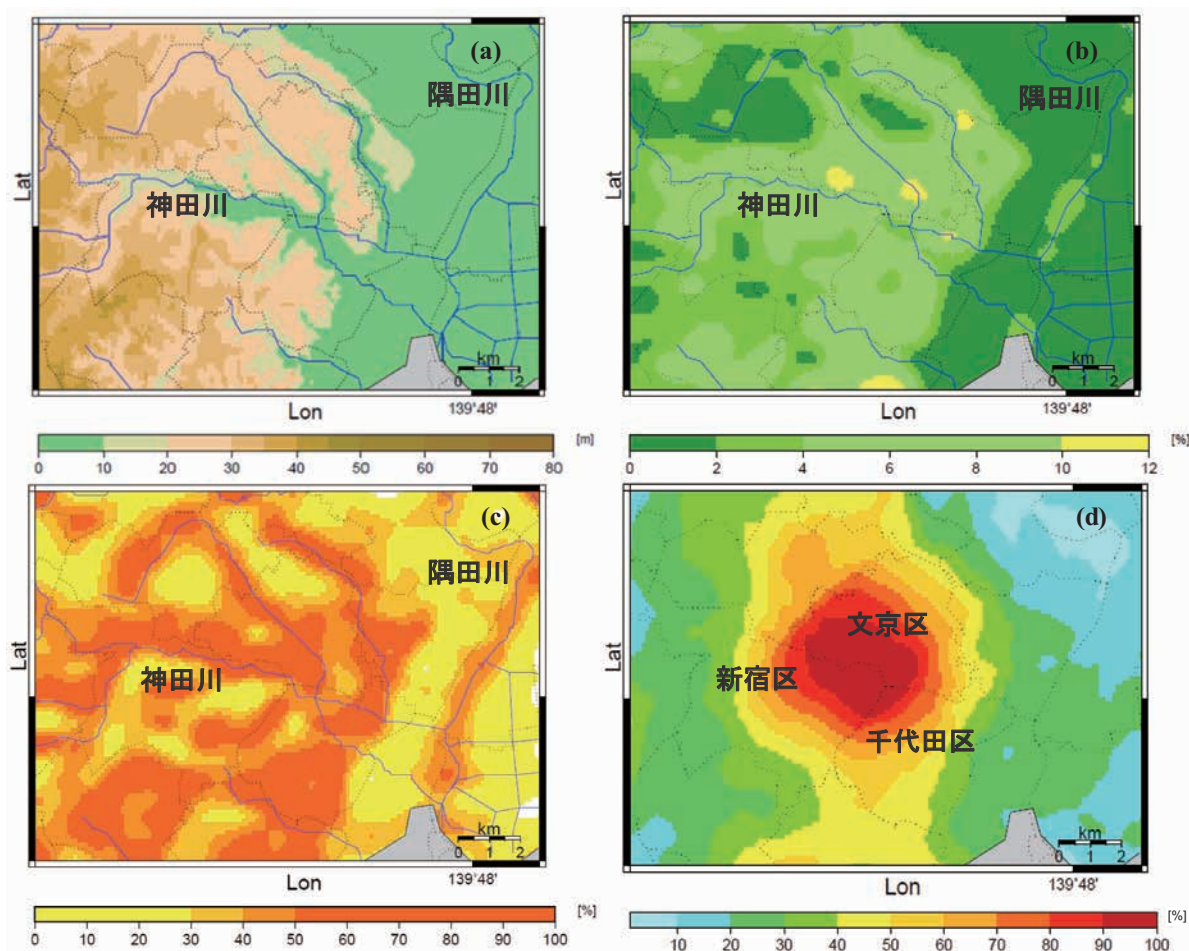


図 14 豊島豪雨対象領域(都心部)における(a) 標高, (b) 勾配, (c) 窪地率, (d) 最大 1 時間雨量
 Fig. 14 (a) Elevation, (b) gradient of topography, (c) area ratio of depressed ground and (d) maximum hourly rainfall in the “urban area”.

う領域である(図 14 (a)). 東側では隅田川を中心とした低地が広がっており, 西側では神田川を中心として河川の付近は低地で, 河川を離れるにつれ標高が高くなる地形となっている. また, 対象地域の平均勾配を図 14 (b) に示す. 標高が 10 m 未満の低地では, 平均勾配が低く, それよりも西側の地域では, 平均勾配が 4 % 以上の地域が広がっている. また, 河川の周辺では河川に向かって標高が低下するため, 勾配が急になっている. 以上のことから, 豊島豪雨の対象領域は, 東側に低地, 西側に河川を中心とした緩い谷地形と有する地域であるといえる. 図 14 (c) に対象地域の窪地率の分布を示す. 神田川周辺の緩い谷地形の地域では窪地率が高い地域が分布している.

本事例で使用する降雨の対象期間は, 8 月 5 日 11 時から 22 時までである. この期間内でもたらされ

た最大の 1 時間雨量をプロットしたものが図 14 (d) である. この対象領域内において MP-JMA 雨量より得られた最大 1 時間雨量の最大は 106.7 mm, 最小は 6.7 mm であった. 新宿区, 文京区, 千代田区の区界付近に最大 1 時間雨量 100 mm の強い降雨の中心があり, 中心から離れるにつれ降雨が弱くなる傾向が見られる. この区界の点を中心とし, 半径 4 km 程の範囲は最大 1 時間雨量 50 mm を超える.

4.2.3 判別分析結果

数量化理論第Ⅱ類による判別分析から得られた主な結果を表 4 (b) に, カテゴリーウエイトを図 15 に示す. 表 4 (b) より, 豊島豪雨事例の判別率の中率は 87.9 % と高く, 実際の内水氾濫の発生・非発生と判別分析による推定がよく一致しているという結果が得られた. また適中率は 29.2 %, 捕捉率は 83.9 % とどちらも 3 事例の中で最も高いことから, 最も精

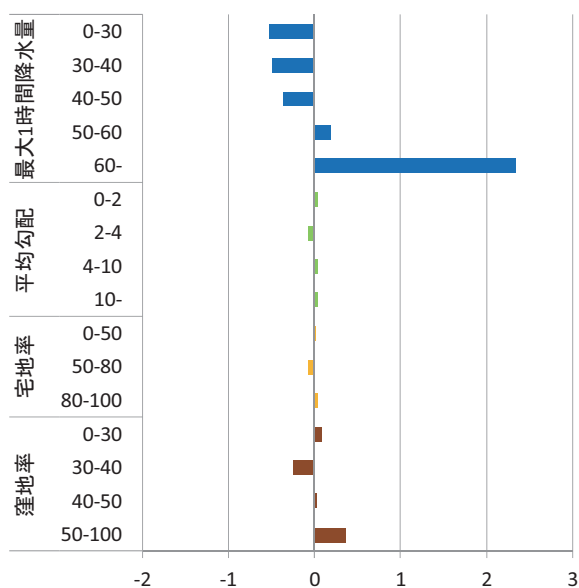


図15 豊島豪雨対象領域(都心部)のカテゴリーウエイト
Fig. 15 Category weights in the “urban area”.

度の高い判別が行われたといえる。この判別分析により得られたカテゴリーウエイトについて詳しく見ると、内水氾濫発生側へ寄与しているカテゴリーは、最大1時間雨量が50mm以上のカテゴリー、平均勾配が2%未満および4%以上のカテゴリー、宅地率が80%以上のカテゴリー、窪地率が30%未満および40%以上のカテゴリーである。これらのカテゴリーウエイトの結果から、最大1時間雨量に関しては、50mmが境界となり、50mm未満の降雨ならば内水氾濫は発生しにくい、50mmを超える降雨になると内水氾濫が発生する危険性があるという結果となった。

平均勾配については、杉並豪雨と同様に2%未満の勾配が緩い地域では内水氾濫が発生する傾向があるが、勾配が急である4%以上の地域においても内水氾濫被害が発生しやすいという結果が得られた。宅地率については、80%を境界とし、80%未満の地域では、内水氾濫被害が発生しにくい、80%を超えるような住宅地・市街地が密集した地域では内水氾濫被害が発生しやすいという結果が得られた。窪地率は、30%以下と起伏の少ない地域で内水氾濫被害が発生するが、50%以上の起伏の激しい地域においても発生しやすいという結果が得られた。

各被害要因の寄与の大きさを比較するため、重要度を算出し、表5(b)に示す。豊島豪雨事例におけ

る被害要因の重要度は、最大1時間雨量が80%と最も高く、次いで窪地率の16%、平均勾配と宅地率については共に2%であった。このことから、豊島豪雨事例では内水氾濫の発生・非発生は、ほぼ最大1時間雨量により判別されており、内水氾濫の発生・非発生を判断する際に平均勾配と宅地率の重要度は極めて低いという結果が得られた。

4.3 2008年8月28日八王子豪雨

4.3.1 概要

八王子豪雨(気象庁では「平成20年8月末豪雨」としている)は、2008年8月28日から29日にかけて東京都八王子市を中心に内水氾濫被害をもたらした豪雨である。八王子市周辺で被害をもたらした前後の28日9時と29日9時の天気図を図16に示す。日本海沿岸に停滞している前線に向かって、日本の南海上の低気圧からの非常に湿った空気の流れ込みが強まり、大気の状態が不安定となり、東海、関東地方に記録的な豪雨をもたらした(気象庁, 2008b)。この豪雨により、東京都八王子市では、1時間降水量63.0mmを観測し、これまでの観測史上1位の記録を更新した。また、24時間の降水量が218.0mm(2月29日04:00)と全国のアメダス雨量計の観測所のうち、この豪雨により観測されたなかで9番目に多い降水量であった。八王子豪雨により発生した浸水被害は、床下浸水209棟、床上浸水93棟、浸水面積15.18haであった。このうち、内水氾濫を原因とする浸水被害は、床下浸水が174棟、床上浸水が83棟、浸水面積が11.05haであった(東京都建設局, 2010b)。

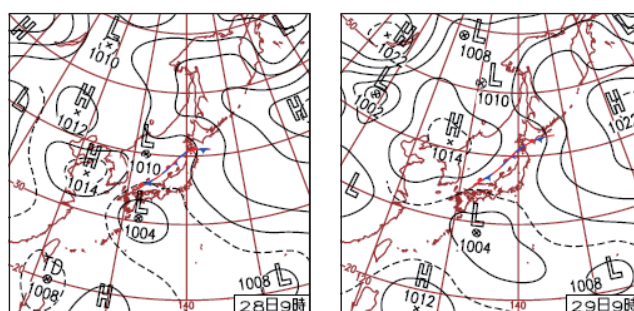


図16 2008年8月28日9時と29日9時の天気図(気象庁)

Fig. 16 Weather charts at 9 JST on 28 and 29 August 2008 (Japan Meteorological Agency).

4.3.2 土地利用・地形・降雨の特徴

八王子豪雨の対象地域の土地利用の面積割合を図 17 に示す。この領域における「建物用地」の割合は、約 46 % であり、住宅や市街地として利用している土地は半分に満たない。杉並豪雨と豊島豪雨の対象地域では、建物用地の割合は 70 % を超えており、八王子豪雨の対象地域は他 2 事例の地域とは土地利用が大きく異なる。この対象地域における建物用地以外の土地利用は、「その他の用地」、「森林」、「その他の農用地」が 40.6 % を占めている。このうち、森林とその他の農用地に関しては、人工的な土地被覆状態の地域よりも雨水の浸透量が多くなるような土地利用であると考えられる。また、建物用地の割合を宅地率として図 18 に示す。宅地率が 80 % を越える地域は分散して分布しており、大部分は宅地率が 50 % 未満の地域である。このことから、住宅および市街地が密集している地域は少なく、多くの住宅は、その他の土地利用の間に分布している状態であるといえる。

対象地域の標高は、33 m から 530 m であり、山地地形を含んだ領域である(図 19 (a))。ここで、黒色の実線以北は東京都、以南は神奈川県であり、本事例では東京側のみを解析対象としている。標高 50 m 未満の地域は河川沿いのわずかな地域のみで大部分は標高が 50m 以上の地域であり、西側に向かうにつれ標高は高くなっていく。この対象地域の平均勾配を図 19 (b) に示す。図中の黄色のコンターは平均勾配 10 % 以上を表している。北東側の立川市や小平市周辺では平均勾配 2 % 未満の平坦な地形が広がっているが、その他の地域では、平均勾配 4 % 以上の地域が多く、10 % を越える地域も広がっている。これは、一方向の傾斜による勾配ではなく、河川による谷地形の勾配であるといえる。以上のことから、八王子豪雨の対象地域は、標高が高く山地や谷を含む比較的起伏の激しい地形である。図 19 (c) に対象地域の窪地率の分布を示す。平均勾配が低かった立川市、小平市周辺を除き、窪地率の高い地域が広範囲に分布しているといえる。このことから、対象地域は、山地や谷の起伏により生じる小規模な窪地が多く分布している地域である。

本事例で使用する降雨の対象期間は、8 月 28 日 17 時から 29 日 4 時までである。この期間内でもたらされた最大の 1 時間雨量をプロットしたものが図

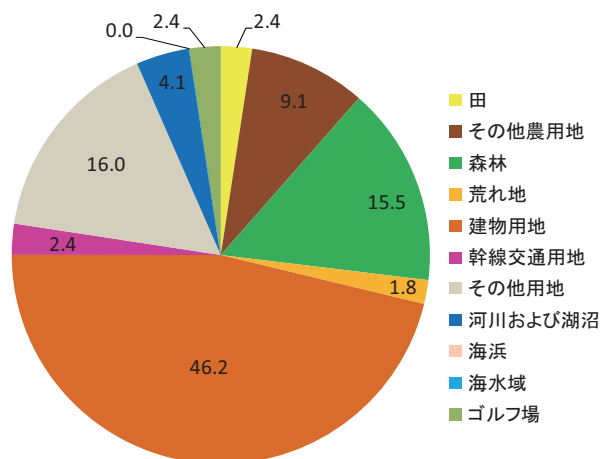


図 17 八王子豪雨対象領域(郊外)における土地利用の面積割合

Fig. 17 Area ratio of land use in the “suburban area”.

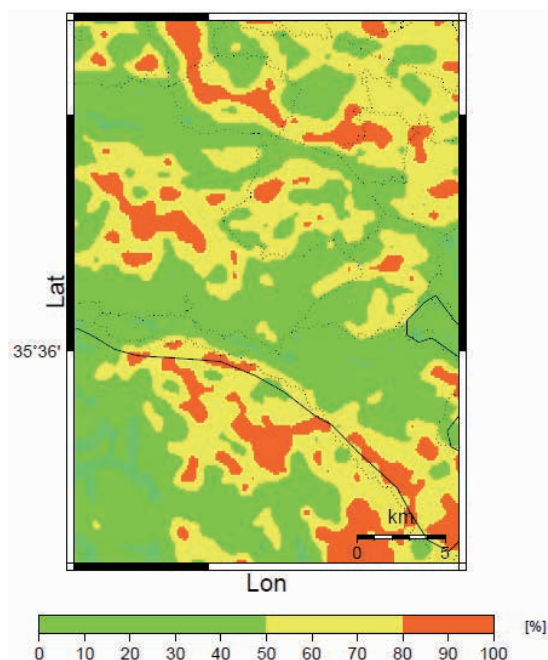


図 18 八王子豪雨対象領域(郊外)の宅地率

Fig 18 Area ratio of buildings in the “suburban area”.

19 (d) である。この対象領域内において MP-JMA 雨量より得られた最大 1 時間雨量の最大は 75.8 mm、最小は 37.3 mm であった。東京都と神奈川県の間境付近で 70 mm を越える降雨が見られるが、多くの地域は 30 ~ 70 mm 程度の降雨である。八王子豪雨では、著しく雨量が多くなっている地域が無く、対象領域には広域的な降雨がもたらされたといえる。

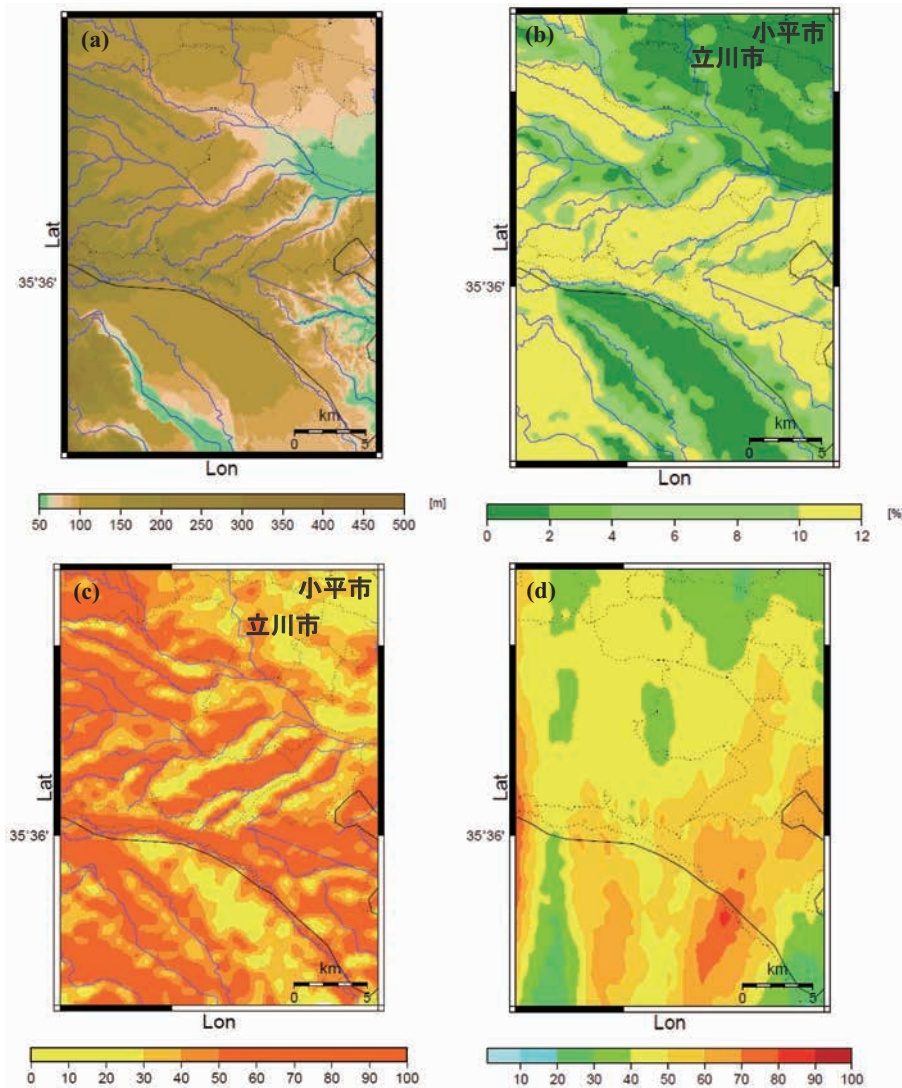


図 19 八王子豪雨対象領域(郊外)における(a)標高, (b)勾配, (c)窪地率, (d)最大1時間雨量
 Fig. 19 (a) Elevation, (b) gradient of topography, (c) area ratio of depressed ground and (d) maximum hourly rainfall in the “suburban area”.

4.3.3 判別分析結果

数量化理論第Ⅱ類による判別分析から得られた主な結果を表 4(c)に示す。この事例における判別的中率は65.9%である。また、推定した内水氾濫発生メッシュ数のうち実際に発生したメッシュ数の割合を表した適中率は、9.8%、実際に発生した内水氾濫のうち推定が一致したメッシュ数の割合を表した捕捉率は、65.8%であった。判別分析の的中率については、杉並豪雨とあまり変わらないが、内水氾濫発生に関する適中率および捕捉率については、3事例のうち最も低い結果となった。

八王子豪雨事例のカテゴリーウエイト(図 20)によると、内水氾濫被害発生側へ寄与しているカテゴリーは、最大1時間雨量 50 mm 以上のカテゴリー、

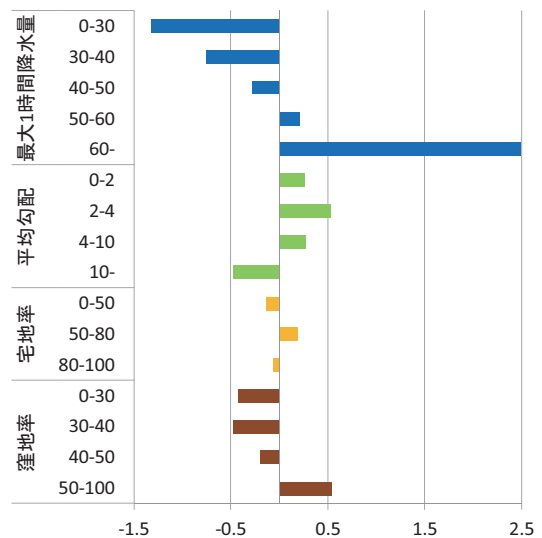


図 20 八王子豪雨対象領域(郊外)のカテゴリーウエイト
 Fig. 20 Category weights for the “suburban area”.

平均勾配 10 % 未満のカテゴリー、宅地率 50 ~ 80 % のカテゴリー、窪地率 50 % 以上のカテゴリーである。これらのカテゴリーウエイトの結果から、最大 1 時間雨量に関しては、50 mm が境界となり、50 mm 未満の降雨ならば内水氾濫は発生しにくい、50 mm を超える降雨になると内水氾濫が発生する危険性があるという結果となった。

平均勾配については、10 % を境界とし、10 % 未満の地域では内水氾濫が発生しやすく、10 % 以上の比較的勾配が急な地域では内水氾濫が発生しにくい傾向があるという結果が得られた。宅地率は、50 ~ 80 % と粗密の程度が中間的な地域において内水氾濫が発生しやすく、50 % 未満や 80 % 以上となる地域では内水氾濫は発生しにくいという結果となった。窪地率については、50 % を境界とし、50 % 未満の地域では内水氾濫は発生しにくく、50 % を超えるような窪地を多く有する地域において内水氾濫が発生しやすいという結果が得られた。表 5 (c) より、八王子豪雨事例における各被害要因の重要度は、最大 1 時間雨量が 63 % と最も高く、平均勾配と窪地率は共に 16 %、宅地率が 5 % と最も低い結果となった。

5. 議論

5.1 3 事例の比較

今回の解析で対象にした 3 事例の共通点は、以下の 4 点である。1 つ目は、最大 1 時間雨量 50 mm を境界とし、50 mm 未満では内水氾濫非発生側に寄与し、50 mm を越えると内水氾濫発生側へ寄与する点、2 つ目は、平均勾配が 2 % 未満の場合、全ての事例において内水発生側へ寄与する点、3 つ目は、宅地率が 50 % 未満の場合、全ての事例において内水非発生側へ寄与する点、4 つ目は、窪地率 50 % 以上の場合、全ての事例において内水発生側へ寄与する点である。

東京都建設局河川部や東京都下水道局では、東京都では現在 1 時間当たり 50 mm の降雨に対応できるよう、河川などの治水施設の整備や下水道等の排水設備の整備を行っており、その整備基準を上回る大雨の場合には対応しきれないとしている(東京都建設局河川部, 2008; 東京都下水道局, 2010)。今回の解析結果から内水氾濫発生と非発生の境界となった雨量も 1 時間雨量 50 mm であった。このことから、最大 1 時間雨量が排水設備の計画降雨である 50 mm

未満であれば、設備基準を下回るため排水が行われるが、最大 1 時間雨量が 50 mm 以上の降雨に対しては設備基準を上回ってしまうため、排水が追いつかず内水氾濫発生に至ってしまうと考えられる。この設備基準は東京都全域で用いられているため、対象とした全ての事例において同様の結果となったと考えられる。

2 つ目の平均勾配 2 % 未満の地域で内水氾濫発生側に寄与する点に関しては、雨水が滞留しやすいという地形条件から、全ての事例で共通したと考えられる。雨水は、地形の高い場所から低い場所へと流れ、勾配が緩くなるほど流速が低下し、滞留しやすくなる。また、これは下水道でも同様である。地中に埋設されている下水道管もポンプがある場所を除き、高低差により雨水を流下されているため、勾配の緩い地域では動水勾配が低下するため雨水が滞留しやすい。この場合下水道が満管になり、マンホールから噴出し、内水氾濫被害を拡大する可能性が考えられる(武田・他, 2007)。以上のことから、平均勾配 2 % 未満の勾配の緩い地域では、全ての事例において内水発生側へ寄与する結果となったと考えられる。

3 つ目の宅地率 50 % 未満の地域では内水氾濫非発生側に寄与する点に関しては、土地被覆状態や被害対象が関係していると考えられる。内水氾濫は、都市化に伴う土地被覆状態の変化により、雨水の浸透能力が低下することで発生しやすくなるため、宅地率 50 % 未満となるような地域は宅地以外の土地利用(その他の農用地や森林など)により雨水の浸透が行われ、内水氾濫発生を軽減していると考えられる。また、本研究では、内水氾濫被害の判断を東京都建設局の浸水被害に基づいて行っている。東京都建設局の浸水被害は、浸水区域面積 0.1 ha 以上もしくは浸水被害棟数が 10 棟以上となる水害としている。そのため、宅地率 50 % 未満の地域では、内水氾濫被害の被害対象自体が少ないことから、全ての事例において内水非発生側への寄与となったと考えられる。

4 つ目の窪地率 50 % 以上の地域で内水氾濫発生側へ寄与している点に関しては、窪地に雨水が滞留し、内水氾濫被害をもたらすためであると考えられる。窪地率はメッシュ内に占める窪地の割合を示した値であり、窪地率 50 % 以上となる地域は、窪地

を多く有している。窪地地形は、地中への浸透や雨水吐への排水以外に雨水の逃げ道がなく、雨水が滞留しやすくなるため、内水氾濫にもつながりやすい地形であるといえる。以上のことから、窪地率 50 % 以上となる地域では、どの事例においても内水氾濫発生側への寄与となったと考えられる。

一方で事例間の相違点も見られた。各事例の被害要因ごとの重要度を示した表 5 によると、都心部では他の地域と比べ平均勾配と宅地率の 2 つの被害要因の重要度が低い傾向がある。これは、都心部は他の地域と比べ平均勾配や宅地率の地域的な差が小さく、内水氾濫被害の発生、非発生に対する寄与が小さくなったためと考えられる。

また都心縁辺部では宅地率 50 % 以上の場合に内水氾濫発生側へ寄与しているのに対し、郊外では宅地率 50 ~ 80 % の場合のみ内水氾濫発生側へ寄与しているという違いもみられた。宅地率が 50 % を超えている地域では、周辺の土地利用のほとんどが住宅地もしくは市街地であり、地表面は建物もしくはアスファルトの舗装により覆われていると考えられる。その結果、雨水の浸透を担う地域が減少し、雨水吐のみで排水を行う必要がある。しかし上述した通り、雨水吐などの排水設備には限界があるため、必然的に宅地率の高い地域では内水氾濫被害が発生しやすくなると考えられる。以上のことから、都心縁辺部では宅地率 50 % 以上の地域において内水氾濫発生側への寄与となったと考えられる。一方で、郊外における宅地率 80 % の地域は、標高が 100 m から 50 m まで低下するような広域的に傾斜している傾斜面上や、標高は高いが勾配が緩く台地状の地形になっている場所に分布しており(図 18)、このような地形では雨水が高い場所から低い場所へと流下するため、滞留が起こりにくく、結果として内水氾濫被害の発生への寄与を小さくしたものと考えられる。

窪地率に関しては、50 % 未満の場合に異なる傾向を示した。都心部では内水氾濫被害の発生・非発生と窪地率の大小に特定の関係は見られなかった。都心縁辺部では、30 ~ 40 % では内水氾濫発生に寄与しているが、40 ~ 50 % では内水非発生側へ寄与していた。しかし都心縁辺部における窪地率 30 ~ 40 % の地域と 40 ~ 50 % の地域分布域はほぼ一致しており、実際には他の要因の影響により発生側

も非発生側にも寄与し得る範囲であった。郊外では、窪地率 50 % を境界とし、50 % 未満では内水氾濫非発生であるが、50 % を越えると内水氾濫発生側へ寄与する結果となった。これは、郊外では都心縁辺部や都心部よりも平坦地形が少なく、ところどころにみられる小規模な窪地に雨水が滞留し、内水氾濫被害につながる傾向があるためであると考えられる。

5.2 過去の研究との比較

数量化理論第Ⅱ類による判別分析を用いた内水氾濫被害の危険度を評価した研究には、高橋・他(1987)の内水害危険度評価に関する研究がある。高橋の研究では、内水氾濫被害をもたらす説明要因として、微視的窪み度、巨視的窪み度、地形分類、非集水域面積、宅地率、日最大雨量、時間最大雨量の 7 つの要因を用いている。また、対象地域を一級水系の流域とし、1 km メッシュを基本単位としている。さらに、複数の一級水系流域について判別分析を実施し、流域間の比較を行っている。高橋らの研究結果では、どの流域においても十分な精度で内水害の発生・非発生が判別できること、降雨量に日降雨量を用いても時間降雨量を用いても結果に大きな差がないこと、内水害発生に大きく寄与している要因はどの地域においても雨量と宅地率であるが、その他の要因の寄与度は流域によってまちまちであることが述べられている。

本研究により得られた結果と高橋・他(1987)の研究結果を比較すると、整合点と相違点が見られる。まず、整合している点は、どの地域においても内水氾濫の発生に雨量が大きく寄与しているという点である。一方、本研究との相違点は、高橋・他(1987)では宅地率がどの領域においても内水氾濫被害に大きく寄与しているが、本研究では必ずしもそうではないという点である。本研究では、都心縁辺部のみ宅地率の寄与度が比較的大きくなるという結果が得られたが、都心部・郊外においては寄与度が小さかった。これは、対象領域の規模が関係していると考えられる。高橋・他(1987)の研究で対象としている領域は、河川法により一級水系と定められている流域である。一級水系の流域面積は、1,000 km² を越える流域が大半であり、高橋らが解析に用いたメッシュ数も 10,000 メッシュ(格子間隔 1 km) を越えている。これに対し、本研究で対象とした地域は、格子間隔

は500 mであり、都心縁辺部は2,160メッシュ、都心部は560メッシュ、郊外は1,362メッシュであった。両者を比較すると、本研究で対象とした各地域の面積は明らかに小さい。このため、地域内での宅地率の変化が少なく、内水氾濫被害の有無に大きく寄与する主要な要因とはならなかったと考えられる。

一方でカテゴリーに注目すると整合点も見られた。高橋の研究結果では宅地率20%未満の地域では、どの流域に関しても内水氾濫非発生に寄与しており、本研究でもどの地域においても宅地率50%未満の地域は内水氾濫非発生に寄与していた。このことから、宅地率が低い地域においては、東京都に限らず内水氾濫被害が発生しにくい傾向があるといえる。

6. 結論

本研究では、MPレーダの観測データおよび国土数値情報を用い、土地分類の異なる3つの地域について数量化理論第Ⅱ類による判別分析を実施し、各土地分類における内水氾濫に対する要因の寄与度について調査を行った。また、判別分析の結果から、3つの地域の共通点および相違点を整理し、東京都全域と各土地分類における内水氾濫被害をもたらす要因の特徴をまとめた。さらに、これらの特徴について過去の研究と比較し、整合点および相違点を示した。これらの調査から本研究により明らかになった結論を以下に示す。

- 1) 東京都では、最大1時間雨量50 mm未満の降雨であれば内水氾濫被害は発生しにくいだが、50 mmを超える降雨では内水氾濫被害が発生しやすい傾向がある。これは、排水設備の計画雨量が50 mmと定められているためと考えられる。
- 2) 東京都では、500 mメッシュの平均勾配が2%未満の地域や、窪地率50%を超えるような窪地を多く有する地域において、内水氾濫被害が発生しやすく、宅地率が50%未満の住宅や市街地が比較的少ない地域では、内水氾濫被害が発生しにくい傾向がある。
- 3) 都心部では、平均勾配や宅地率といった土地条件の寄与度が低く、最大1時間雨量により内水氾濫被害の発生地域を説明することができる。
- 4) 都心縁辺部では、土地条件による寄与が他の地域よりも高く、雨量以外の被害要因が内水氾濫

の発生に影響する。中でも、500 mメッシュの平均勾配が2%未満で宅地率が80%以上の条件を満たすような平坦な住宅地において内水氾濫被害が発生しやすい傾向がある。

- 5) 郊外では、土地条件の寄与度がやや低く、最大1時間雨量の寄与度が高い傾向がある。しかし、窪地率が50%を超えるような窪地を多く有する地形においては、内水氾濫被害が発生しやすいという特徴がある。
- 6) 過去の研究との比較から、内水氾濫被害の発生に雨量が最も大きく寄与しているという点で整合が見られた。しかし、宅地率の寄与については、過去の研究ほど明確な寄与が見られない事例があった。ただし、宅地率の低い地域では、内水氾濫被害が発生しにくいという特徴に関しては過去の研究と一致している。

謝辞

本報告書は第一著者が防災科学技術研究所に研究生として在籍中に、筑波大学卒業研究として実施した研究をとりまとめたものである。防災科学技術研究所の真木雅之氏、故加藤敦氏、鈴木真一氏、平野洪賓氏に貴重な御助言を頂きました。さらに、筑波大学水文科学分野の先生方に貴重な御意見を頂きました。関係者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 石井敏雄・石橋道生(1989)：時間最大雨量による内水氾濫危険度評価について。土木学会第44回年次学術講演会概要集，No.2，178-179。
- 2) 岩波 越・前坂 剛・木枝香織・真木雅之・三隅良平・清水慎吾(2007)：Xバンド偏波レーダーによる降雨観測における簡易補正。日本気象学会2007年春季大会講演予稿集，p128。
- 3) Iwanami, K., Misumi, R., Maki, M., Wakayama, T., Hata, K., and Watanabe, S. (2001)：Development of a multiparameter radar system on mobile platform. Preprints, 30th Conf. on Radar Meteorology, 104-106。
- 4) 加藤 敦・真木雅之・岩波 越・三隅良平・前坂剛(2009)：Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト。水文・水資源学会誌，Vol.22，No.5，372-385。

- 5) 国土交通省(2004)：都市部で顕在化する「内水氾濫」。水害対策を考える，第3章，3-3-2，http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-3-2.html (2011/12/21 閲覧)。
- 6) 気象研究所(1986)：ドップラーレーダによる気象・海象の研究。気象研究所技術報告，No.19，第2章，64-65。
- 7) 気象庁(2008a)：大気の状態不安定による大雨 平成20年(2008年)8月4日～8月9日，1-7。
- 8) 気象庁(2008b)：平成20年8月末豪雨，平成20年(2008年)8月26日～8月31日，1-8。
- 9) Park, S. -G., Maki, M., Iwanami, K., Bringi, V. N., and Chandrasekar, V. (2005)：Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band.Part II: Evaluation and Application. J. Atmos. Oceanic Technol., **22**, 1633-1655.
- 10) 佐藤義治(2009)：多変量データの分類：判別分析・クラスター分析，朝倉書店，52-67。
- 11) 関根正人・河上展久(2003)：都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析。水工学論文集，Vol.47，889-894。
- 12) 高橋 裕・小池俊雄・水谷 誠(1987)：内水氾濫危険度評価に関する研究－発生・非発生分析－。水理講演会論文集，第31回，259-264。
- 13) 高堀 章・前坂 剛・三隅良平(2009)：Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定 - 複数仰角 PPI データを用いた改善効果について -。防災科学技術研究所研究報告，No.73，41-47。
- 14) 武田 誠・森田 豊・松尾直規(2007)：下水道システムを考慮した氾濫解析の治水対策への適用。水工学論文集，Vol.51，529-534。
- 15) 東京都下水道局(2008)：雑司ヶ谷幹線再構築工事事故調査報告書，4-6。
- 16) 東京都建設局(2007)：平成17年9月4日(集中豪雨)の一般資産被害調査，http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/suigai_kiroku/h17/0904_shisa.htm (2012/1/16 閲覧)。
- 17) 東京都建設局(2010a)：平成20年8月5日(集中豪雨)の一般資産被害調査，http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/suigai_kiroku/h20/0805_shisa.htm (2012/1/16 閲覧)。
- 18) 東京都建設局(2010b)：平成20年8月28日(8月末豪雨)の一般資産被害調査，http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/suigai_kiroku/h20/0828_shisa.htm (2012/1/16 閲覧)。
- 19) 東京都建設局河川部(2008)：浸水予想区域図-Q&A-，平成20年3月4日改定，1-2。
- 20) 東京都下水道局(2010)：「東京都下水道事業経営計画2010」の概要 - 東京都の現在を支え，未来を創る下水道。平成22年2月22日，85pp。
(2012年10月1日原稿受付，
2012年11月13日改稿受付
2012年11月13日原稿受理)

要 旨

東京都では、浸水被害の約 80 % を内水氾濫が占めており、内水氾濫被害の対策が重要な課題となっている。本研究は東京都において内水氾濫被害をもたらす要因の寄与について、X バンド MP レーダに基づく雨量や国土数値情報を用いて、数量化理論第Ⅱ類による判別分析で解析した。判別分析の結果、東京都において最も内水氾濫に寄与する要因は最大 1 時間雨量であり、最大 1 時間雨量が 50 mm を超えると内水氾濫被害が発生する傾向がみられた。また、宅地率や窪地率も内水氾濫被害発生に寄与するが、地形の勾配は負の寄与をすることが分かった。

キーワード：都市型水害，X バンドレーダ，数量化理論Ⅱ類，局地豪雨