

GIS を用いた集中豪雨による浸水被害予測に関する研究 Research on Prediction of the Damage Caused by Local Torrential Downpour

小池 晶夫
KOIKE, Akio

概要：近年、集中豪雨による洪水や浸水などの被害が増加傾向にある。最近の例として 2013 年 7 月 23 日に東京都世田谷区で発生した集中豪雨では、125 件もの浸水被害が発生した。本研究では、集中豪雨による被害が多発している東京都世田谷区を対象地とし、GIS を用いて、水の流れや地面への浸透、下水道の排水能力などを考慮した浸水被害予測モデルを開発し、さまざまな検証を行った。

Summary: In recent years, local torrential downpour has frequently occurred in big cities including Tokyo. Local torrential downpour can cause a lot of problems like flooding. Recently, a local torrential downpour occurred on July 23rd, 2013 caused 125 cases of flooding damage in Setagaya ward. In this study, the damage of local torrential downpour is firstly analyzed based on past flood damage records and geographical information. Then, the drainage capacities of different areas in Setagaya ward are investigated. Finally, a model which can predict the damage of local torrential downpour is developed.

キーワード：集中豪雨・洪水被害・都市排水・被害予測・地理情報システム

Keywords: Local Torrential Downpour, Flood Damage, Urban Drainage, Damage Prediction, GIS

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、異常気象等の影響により、都市部を中心に狭い範囲で 1 時間に 50mm を超える集中豪雨が頻繁に発生している。集中豪雨による家屋などの浸水被害も増加傾向にある。

これまで、集中豪雨による被害予測に関する研究が数多く行われてきた。しかし、その多くは堤防が決壊したり、河川の水が溢れたりすることで発生する浸水被害(外水氾濫と呼ぶ)の予測に関する研究であった。2000 年 9 月 11 日に愛知県名古屋市中で発生した東海集中豪雨以降、下水道や雨水浸透貯留施設の整備が不十分で雨水の排水機能が追いつかずに発生する浸水被害(内水氾濫と呼ぶ)が多発するようになった。また、集中豪雨による浸水被害の発生要因は、外水氾濫よりも内水氾濫の方がはるかに多い。このような状況の中、内水氾濫による浸水被害を予測できるモデルも開発されるようになった。しかし、いずれのモデルも公開されていないデータが必要となり、どの自治体でも簡単に使用できないのが現状である。そのため、どのくらいの雨で浸水被害が発生するのかを簡単に検証できるモデルが求められている。

1.2 研究目的

本研究では、集中豪雨による被害が多発している東京都世田谷区を対象地とし、GIS を用いて、水の流れや地面への浸透、下水道の排水能力などを考慮した浸水被害予測モデルを開発し、さまざまな検証を行う。

2. ArcGIS を用いた水文解析

本研究では、雨水が地表面をどのように流れるかを分析するため水文解析を行う。手順は以下のとおりである。

- ① 基盤地図情報の収集と変換
- ② 水の流れる方向を示した流向ラスタの作成
- ③ 各セルに流れ込む雨量を示した累積流量ラスタの作成
- ④ 重み付けをし、雨水の流れ方を示した河道図の作成

2.1 水文解析のための基盤地図情報の収集と変換

本研究では、水文解析に国土地理院が提供している基盤地図情報を利用する。また、標高データは 5m メッシュデータを利用する。

国土地理院の基盤地図情報は XML ファイルとなっており、そのままでは ArcGIS で利用することができない。そのため、国土地理院より提供されている基盤地図情報ビューアを用いてシェープファイルへ変換する。

変換した標高データを ArcGIS に追加すると、標高データがポイントデータの集合になっていることがわかる。これは DEM と呼ばれ、地表面を等間隔に分割したエリアの代表点にその地点の標高値を与えたものである。

水分解析を行うには列と行で整理されたグリッドで表現されるラスタデータに変換しなければならない。そのため IDW という手法を用いてラスタ化する。IDW とは、線形的に加重されたサンプルポイントセットを組み合わせることでセル値を求める手法である。また、本研究では 1 つのセルサイズを縦 10m 横 10m の 100 m² に設定し

た。図1はラスタデータに変換した標高データのグラデーション図である。

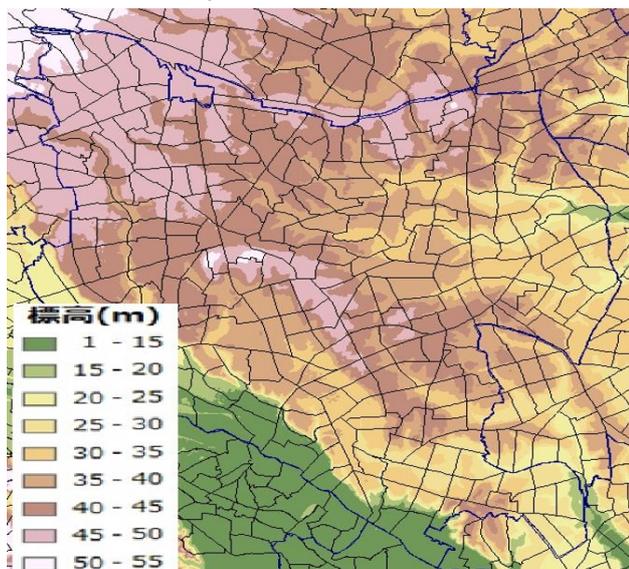


図1 標高ラスタデータ

2.2 水文解析

まず、標高ラスタデータを基に、各セルから流出する流れの方向を示す流向ラスタを作成する。水の流れる方向は隣接する最も急下傾斜となるセルとなり、北・北東・東・南東・南・南西・北西の8方向に分けられる(図2)。

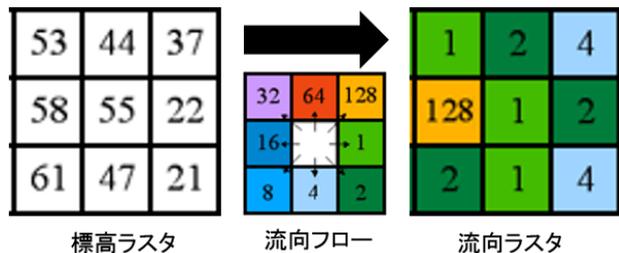


図2 流向ラスタの仕組み

次に、流向ラスタを基に、各セルに流れ込むセルの数を示す累積流量ラスタを作成する。これは対象のセルに流れ込む全てのセルの累計値となる(図3)。

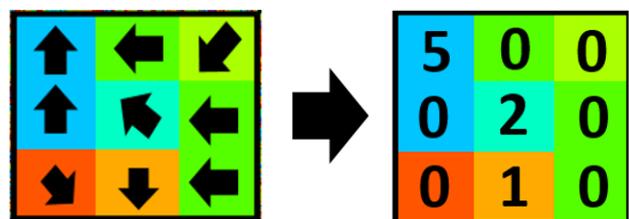


図3 累積流量ラスタの仕組み

累積流量ラスタは、そのままでは無数に河道が存在し、わかりにくい。そのため、累積流量の値に重み付けをし、ある程度大きな河道を表示する。本研究では、累積流量の値が 2000 以上のセルを表示するように重み付けをした。

東京都世田谷区の1町丁の面積は約 0.2 km²ある。1つのセルサイズが 100 m²なので累積流量 2000 より大きいセルがある町丁は、隣接する町丁から雨水が流れ込み、

累積流量 2000 より大きいセルがない町丁は、隣接する町丁よりも標高が高いため雨水が流入しないと考えられる。

本研究では、水文解析の結果を踏まえ、累積流量 2000 より大きいセルがある町丁は1町丁分の表面流出水が流入するとした。本来であれば、世田谷区全体に降雨した場合、1町丁以上の雨水が流入する町丁がある。しかし、集中豪雨は比較的狭い範囲で降雨する点と表面流出の雨量を求める際に面積が大きくなると精度が低下する点を踏まえ1町丁分までの表面流入量に留めた。図4は、赤い町丁が1町丁分の雨水が流入し、白い地区は流入がないことを示している。

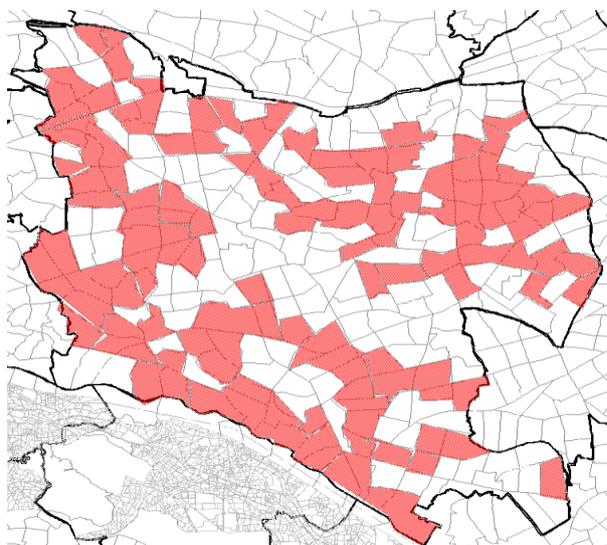


図4 表面流入がある地区(濃い色)とない地区(白)

3. 内水氾濫被害予測

本章では、内水氾濫被害予測に必要な情報の算出・推定方法と内水氾濫被害予測モデルについて述べる。

3.1 内水氾濫被害予測に必要な情報

内水氾濫被害予測には表面流入量、表面流出量、流域対策による雨水浸透貯留量、下水道による雨水排水量の4つの情報が必要となる。

3.1.1 表面流入量と表面流出量の算出

各町丁に地表面を流れて流入してくる雨量と各町丁から地表面を流れて流出する雨量を計算する。本研究では、これらの計算に合理式を用いる。

合理式とは、洪水流量を求める簡便な式である。ピーク雨量を r (mm/h)、流出係数を f 、流域面積を A (km²)とするとピーク流量 Q (m³/s)を次の式で求められる。

$$Q = (1/3.6) \times f \times r \times A \quad (\text{式 3.1})$$

流出係数には加重平均法を用いて世田谷区の平均流出係数を算出し用いた。地目別面積を A_i 、工種別係数を f_i とし、各工種別面積を考慮した平均値を次の式で求められる。

$$f = \Sigma(f_i \cdot A_i) / \Sigma A_i \quad (\text{式 3.2})$$

工種別係数には小規模下水道施設基準の流出係数の中央地を用いた[1]。また、地目別面積には世田谷区の発表している土地利用内訳の数値を用いた[2]。世田谷区の平均流出係数を計算したところ0.54となった。

合理式に各数値を入れ、世田谷区の各町丁の表面流出量を計算したところ $Q=0.03r(\text{m}^3/\text{s})$ となった。また、図4における黒い地区(表面流入がある地区)の表面流入量も $Q=0.03r(\text{m}^3/\text{s})$ となる。

3.1.2 流域対策による雨水浸透貯留能力の推定

流域対策とは、総合的な治水対策の一環として、流域内に降った雨水を貯留や浸透させることで河川や下水道への流出を抑制する対策のことである。

東京都では、近年増加している集中豪雨に対する整備を進めるため、東京都豪雨対策検討委員会を設置し、各流域における流域対策量を取り決めた東京都豪雨対策基本方針を作成した。東京都豪雨対策基本方針では、平成29年までに5mm/h相当分の流域対策を行うことを目標にしている。

世田谷区では、東京都豪雨対策基本方針の目標値を達成するために世田谷区豪雨対策基本方針を策定し、神田川流域など5つの流域で流域対策を進めている。各流域の目標値と平成25年までの実施率は以下のとおりである(表1)。

表1 各流域における対策目標値と実施率

流域名	目標値(m ³)	実施率(%)
神田川	14,900	96
目黒川	227,000	70
呑川	58,000	33
野川	79,000	61
丸子川・谷沢川	101,350	62

流域対策の目標値を達成することで5mm/hの雨水の流出抑制が期待できるため、本研究では5mm/hに実施率を掛けた数値を各流域における流域対策量とした。

3.1.3 下水道による雨水排水能力の推定

世田谷区では、合流式下水道と分流式下水道の両方が混在している。合流式下水道とは、1本の管渠に汚水と雨水をまとめて流下させる方式で、分流式下水道は雨水と汚水を別々の管渠で流下させる方式である。世田谷の下水道の雨水排水能力は25mm/hで整備されてきたが、集中豪雨による被害が増加したため、50mm/hへ対応するための整備が進められるようになった。合流式下水道区域では、50mm/hに対する整備がほぼ完了しているが、分流式下水道区域では約20%の区域でしか50mm/hに対する整備が完了していない。

世田谷区の合流式下水道区域は北東エリアで、分流式区域は南西エリアである(図5)。本研究では、下水道の仕組みや豪雨に対する整備状況の違いを考慮し、合流式下水道区域は、雨水排水能力を50mm/hとした。また、分流式下水道区域では雨水排水能力を30mm/hとした。



図5 下水道別区域図

3.2 内水氾濫被害予測モデルの計算式

ここまでの分析や調査を通して得られた情報を基に、内水氾濫被害予測に必要な情報を各町丁に合わせて計算する。各パラメータの計算式または値は次の通りである。

$Q1$: 町丁に直接降り注ぐ降雨量 [m³/s]

$$Q1 = (1000000/3600) \times r \times A \quad (\text{式 3.3})$$

$Q2$: 町丁に流れ込む表面流入量 [m³/s]

$$Q2 = (1/3.6) \times f \times r \times A \quad (\text{式 3.4})$$

$Q3$: 町丁から流出する表面流出量 [m³/s]

$$Q3 = (1/3.6) \times f \times r \times A \quad (\text{式 3.5})$$

$Q4$: 下水道による雨水排水量 [m³/s]

$$Q4 = (1/3600000) \times d \times A \quad (\text{式 3.6})$$

$Q5$: 地下浸透量 [m³/s]

$$Q5 = (1/3600000) \times p \times A \quad (\text{式 3.7})$$

A: 対象町丁面積 [km²] r: 降雨強度 [mm/h]

f: 流出係数 d: 下水道の雨水排水能力 [mm/h]

p: 流域対策による地下浸透量 [mm/h]

このとき、 $Q1+Q2>Q3+Q4+Q5$ となる r が、内水氾濫被害が発生する可能性がある集中豪雨の最小降雨強度である。

3.3 内水氾濫被害予測の結果と検証

内水氾濫被害予測モデルの計算式に世田谷区の各条件を入れ計算したところ、各流域で浸水被害が発生する可能性がある最小の降雨強度は表2に示すような結果となった。

内水氾濫被害予測の結果を平成25年7月23日、平成23年8月26日、平成21年8月24日の集中豪雨の被害記録と比較したところ、被害が発生すると予測された場所と実際に被害が発生した場所が一致した確率はそれぞれ62%、83%、83%であった。

表2 内水氾濫被害予測結果

流域名	内水氾濫被害発生降雨強度	図4における町丁の色
神田川	122mm/h	白
目黒川	119mm/h	白
目黒川	55mm/h	赤(グレー) ※1
呑川	115mm/h	白
呑川	52mm/h	赤(グレー)
野川	74mm/h	白
野川	34mm/h	赤(グレー)
谷沢川・丸子川	74mm/h	白
谷沢川・丸子川	34mm/h	赤(グレー)
多摩川	78mm/h	白
多摩川	36mm/h	赤(グレー)

※1 : カラー印刷の場合は赤、白黒印刷の場合はグレー

4. 外水氾濫被害予測

本章では、外水氾濫被害予測に必要な情報の算出方法と外水氾濫被害予測モデルについて述べる。外水氾濫被害予測には、内水氾濫被害予測で用いたパラメータの他、河川流量と地下水流出量が必要となる。

4.1 河川流量の算出

対象河川の最大河川流量をマンニングの式を用いて計算する。

$$V = R^{2/3} \times I^{1/2} \div n \quad (\text{式 4.1})$$

$$R = A \div S \quad (\text{式 4.2})$$

$$Q = A \times V \quad (\text{式 4.3})$$

V : 流速 R : 径深 Q : 流量 I : 動水勾配

n : マニングの粗度係数 A : 通水断面積 S : 潤辺

世田谷区では、平成元年から25年までの間で外水氾濫による浸水被害が発生したのは多摩川水系の仙川だけである。そのため、本研究では仙川を対象河川とした。

仙川の河川流量をマンニングの式で計算したところ、仙川の河川流量は約 120 m³/s であった。

4.2 外水氾濫被害予測モデルの計算式

外水氾濫被害予測に必要な情報を各町丁に合わせて計算する。各パラメータの計算式または値は次の通りである。また、地下水流出量の計算には ishihara&kobatake のタンクモデルで使用されている全国一律の浸透係数を用いて計算する[3]。

Q1 : 地表面を流れて河川に流入する雨量 [m³/s]

$$Q1 = (1/3.6) \times f \times r \times A1 \quad (\text{式 4.4})$$

Q2 : 下水道から河川に流入する雨量 [m³/s]

$$Q2 = (1/3600000) \times d \times A1 \quad (\text{式 4.5})$$

Q3 : 地下浸透 1 [m³]

$$Q3 = 0.001 \times r \times A1 \times B1 \quad (\text{式 4.6})$$

Q4 : 地下浸透 2 [m³]

$$Q4 = Q3 \times B2 \quad (\text{式 4.7})$$

Q5 : 地下水流出により河川に流入する雨量 [m³]

$$Q5 = \{Q3 - Q4 - (A1 \times L)\} \times \alpha1 \quad (\text{式 4.8})$$

Q6 : 河川に直接降り注ぐ雨量 [m³]

$$Q6 = (1000000/3600) \times r \times A \quad (\text{式 4.9})$$

Q7 : 河川流量 [m³/s]

$$V = R^{2/3} \times I^{1/2} \div n \quad (\text{式 4.10})$$

$$R = A3 \div S \quad (\text{式 4.11})$$

$$Q7 = A \times V \quad (\text{式 4.12})$$

A1 : 対象流域面積 [km²] r : 降雨強度 [mm/h]

A2 : 河川面積を除いた流域面積 [km²] f : 流出係数

d : 下水道の雨水排水能力 [mm/h]

B1 : 浸透係数 1 B2 : 浸透係数 2

α1 : 地下水流出係数 L : 流出孔の高さ [mm]

(B1=0.14 B2=0.05 α1=0.15 L=15)

V : 流速 R : 径深 I : 動水勾配

n : マニングの粗度係数 A3 : 通水断面積 S : 潤辺

このとき Q1+Q2+Q5+Q6>Q7 となる r が、外水氾濫による浸水被害が発生する可能性がある集中豪雨の最小降雨強度である。

4.3 外水氾濫被害予測の結果と検証

外水氾濫被害予測の結果、仙川は流域全体に 93mm/h 以上の雨が降ると外水氾濫による浸水被害が発生する可能性があるとして予測された。平成 17 年 9 月 14 日に仙川の外水氾濫による被害が発生したとき、仙川下流付近の大蔵 5 丁目で 89mm/h の降雨が観測された。そのため、この結果は概ね妥当であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、内水氾濫と外水氾濫による集中豪雨被害予測モデルを開発した。前者は表面流出や表面流入、下水道の排水能力、流域対策による浸透貯留能力等のパラメータを用いた予測モデルであり、モデルの予測精度は 60%~80% であった。様々な検証の結果、予測精度が流域対策や下水道の排水能力に大きく左右されていることが分かった。予測精度を向上させるためには、流域対策や下水道の排水能力などに関する正確なデータの把握が必要不可欠である。

一方、後者は内水氾濫被害予測で用いたパラメータの他に、河川流量や地下水流出量などを加えた予測モデルである。外水氾濫被害予測の結果、仙川流域で 93mm/h 以上の雨が降ると被害が発生する可能性があるとして予測された。これは、実際に被害が発生した時の降雨強度と比べて、4mm/h しか誤差がなかったため、高い予測精度が得られた。ただし、国や各自治体の様々な対策が講じられたため、外水氾濫があまり起こっていない。そのため、検証が十分とはいえない。

参考文献

- [1] 建設省河川砂防技術(案)同解説調査編 山海堂
- [2] 地域分析のための熱・水収支水文学 古今書院
- [3] Runoff Model for Flood Forecasting ishihara&kobatake 1979