

都市水害の発生・非発生に関する判別分析

東京大学工学部土木工学科 正員 ○安藤義久
東京大学工学部土木工学科 正員 高橋 裕
新潟県土木部 正員 田辺敏夫

1. はじめに

近年、わが国では都市水害が頻発し、重要な社会的問題の一つになっている。従って、都市水害の克服は都市河川計画の重要課題と考えられる。従来の都市河川の治水計画の検討方法は、計画洪水流量を既往の実測値、あるいは類似河川の比流量、または計画降雨から洪水流出解析により推定し、河川計画を立案するという方法であった。しかし、都市水害が問題となる都市内の中小河川では、長期にわたる洪水流量データが整備されている所はまれであり、降雨記録や水害の記録のみがあるという所が多いのが実状と考えられる。そこで、筆者らは、既往の降雨記録や水害の記録を今後の都市河川の治水計画へ役立てる手法の開発が重要であるとする。本稿では、都市水害の発生・非発生を雨量、流域の土地利用（都市化の程度）、および河道の疎通能力という要因を用いて判別する判別分析の適用可能性について検討を加える。

2 対象河川流域の概要¹⁾

本研究で対象とする河川流域は、水害記録と降雨記録が長期間にわたり保存されている東京都内の中小河川である。すなわち、石神井川中流域、神田川上流域、善福寺川流域、および烏山川流域の4流域である。この4流域の位置を図1に示す。石神井川の水源は、小平市の小金井カンツリー内にあり、途中に富士見池、三宝寺池などの湧水地帯を経て、北区において隅田川に合流するが、本研究ではその中流域を対象とする。神田川は、井の頭池に源を発し、途中で善福寺川と妙正寺川を合流し、中央区で隅田川に流入するが、今回は、善福寺川合流点より上流域の神田川上流域と善福寺川流域を対象とする。また、三鷹市に源を発する目黒川水系の烏山川流域も対象とする。表1には、対象河川流域の諸元を示すが、流域面積が10～50km²の細長い形状の中小河川であることがわかる。

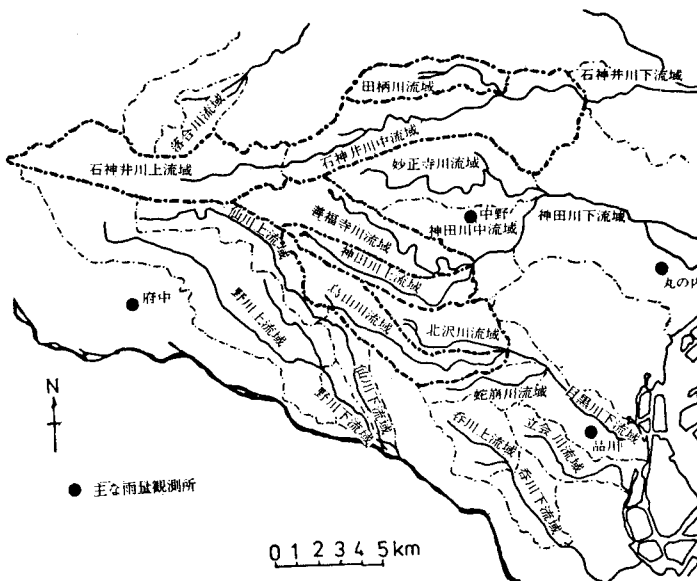


表1 対象河川流域の諸元

項目 流域	流域面積 (km ²)	流路延長 (km)
石神井川中流域	48.0	18.0
神田川上流域	11.8	9.8
善福寺川流域	18.3	8.8
烏山川流域	14.3	11.6

図1 対象河川流域の概要

3. とりあげる要因の整理

高橋・安藤・田辺²⁾は、東京都の台地部の7つの中小河川を対象にして、戦後の25年間における各流域の浸水害発生限界雨量の経年的変化を都市化率（宅地率）および河道の疎通能力との対応関係で検討して、浸水害発生限界雨量の変動は、ある程度、流域の都市化率と河道の疎通能力の変動により説明できることを示し、さらに流域の都市化の進行は浸水害発生限界雨量を低下させるマイナス要因であり、河川改修による河道の疎通能力の増大は浸水害発生限界雨量を上昇させるプラスの要因であることも実証的に示している。従って、本稿では、都市水害の発生・非発生に関する要因として、雨量、流域の都市化率、および河道の疎通能力をとりあげる。

(1) 水害の発生・非発生のデータは、対象河川流域（石神井川中流域、神田川上流域、善福寺川流域、烏山川流域）ごとに、昭和29年（1954年）から昭和53年（1978年）までの25年間における水害記録、即ち、東京都建設局河川部作成の「東京都水害資料」³⁾と「東京都水害記録」⁴⁾および建設省の「水害統計」⁵⁾に基づき整理した。

(2) 雨量要因は、対象流域の流域面積が比較的小さいので、時間最大雨量を採用する。雨量観測所は、図1中に示す中野と府中である。時間最大雨量のデータは参考文献3)と4)に収録されているものを用いる。

(3) 流域の都市化率は、流域の宅地率で代用する。宅地率は、「東京都統計年鑑」⁶⁾の昭和28年版より昭和52年版を用いて、各年度の1月1日付の課税対象宅地面積より算定する。

(4) 対象河川の疎通能力は、東京都建設局河川部発行の「都市河川の流出特性に関する調査（その1）報告書」⁷⁾により、流域の平均的な疎通能力を算定する。

上記の各要因の対応関係を示すために、参考文献2)から、石神井川中流域の場合を引用して例示する。図2には、石神井川中流域を対象にして、昭和29年（1954年）から昭和53年（1978年）までの25年を5年ごとの5期に分け、各期間の浸水害発生限界雨量R（各流域における各期間ごとの浸水害発生時の時間最大雨量の中での最小値）と都市化率Uと河道の疎通能力Dの対応関係を示す。都市化率は、第1期の25%から第5期の50%まで倍増しており、急激な都市化の進行が認められる。第3期に浸水害発生限界雨量の低下がみられるが、これは流域内で都市化が進行しているにもかかわらず、河道の疎通能力が一定のままに放置されていたためと読みとれる。逆に、第5期に入って、浸水害発生限界雨量の上昇がみられるが、これは河川の疎通能力の増大によると解釈できる。このように、流域の都市化は浸水害発生限界雨量を低下させるマイナス要因であり、河川改修による河道の疎通能力の増大は浸水害発生限界雨量を上昇させるプラス要因であることが実証的に示されている。

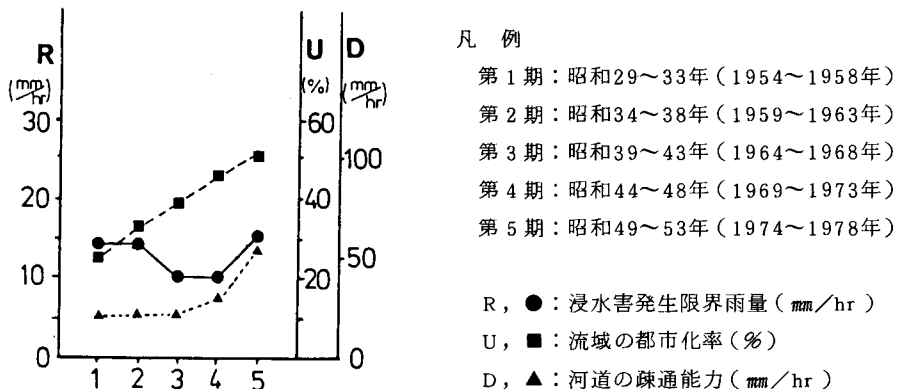


図2 石神井川中流域における浸水害発生限界雨量と流域の都市化率と河道の疎通能力との対応関係

4. 線型判別分析

ここでは、都市水害の発生・非発生に関する線型判別分析について述べる。

(1) 分析の方法

雨量、都市化率、および河道の疎通能力のデータを用いて、各サンプル降雨において水害が発生するか発生しないかを判別することを考える。水害の発生・非発生を判別する式として次の線型判別関数を考える。

$$Z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

ただし、 x_1 ：中野における時間最大雨量（mm/hr）、 x_2 ：府中における時間最大雨量（mm/hr）、

x_3 ：河道の疎通能力（mm/hr）、 x_4 ：流域の都市化率、

a_1, a_2, a_3, a_4 ：係数、 a_0 ：定数項、である。

判別分析とは、 x_{kj} をサンプル j がもつ要因 k の値とすると、 Z_j はその一次式で表わされた数値であり、この Z_j がある一定値 C より大であればサンプル j は第 1 グループ（都市水害発生）に属し、 C より小であれば第 2 グループ（都市水害非発生）に属すると判別するが、この判別がもっともうまくいくように a_k を決める分析手法である。⁸⁾

今回は、選択要因を変化させ、次の 4 ケースについて線型判別分析を行なった。

(a) 雨量のみの場合

$$Z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

(b) 雨量と疎通能力の場合

$$Z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

(c) 雨量と都市化率の場合

$$Z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_4 x_4 + a_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

(d) 全要因の場合

$$Z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{5}$$

なお、計算は HSAP 統計計算ライブラリ⁹⁾を用いて東京大学大型計算機センターで行なった。

(2) 分析結果と考察

表 2 には、都市水害の発生・非発生に関する線型判別分析の結果を示す。サンプル数は、石神井川中流域、神田川上流域、および善福寺川流域が 83 であり、烏山川流域が 76 である。また、サンプル降雨の中で水害が発生した数は流域によって異なり、18～34 である。

表 2 の中で的中率に着目すると、75～88% であり、比較的高い値を示す。また、4 流域の全てにおいて、雨量のみの場合の的中率より雨量と疎通能力、雨量と都市化率の場合の的中率の方が高いか等しいかであり、また、全要因の場合の的中率が 4 ケースの中で最高値を示すことがわかる。

なお、図 3 には、都市水害の発生・非発生に関する線型判別分析の結果の累積グラフを、雨量要因のみの場合と全要因の場合との 2 通りについて図示する。

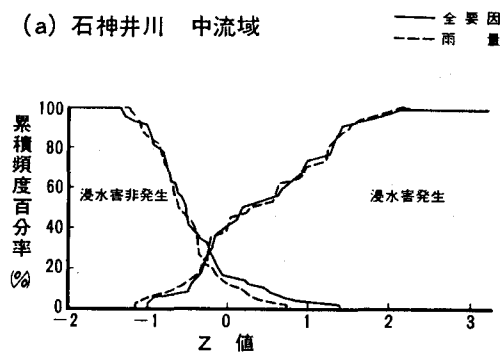
次に、表 2 の中で判別関数の要因別の係数に着目する。雨量の係数は、どの要因と組合わせた際でも安定している。それに比べて、疎通能力と都市化率の係数は不安定である。次に、全要因の場合の係数の符号に着目すると、雨量要因は水害の発生を助長する要因でありプラス符号のはずであり、4 流域ともプラスであり妥当な結果といえる。一方、都市化率は水害の発生を助長する要因でありプラス符号のはずであり、石神井川中流域、神田川上流域、および烏山川流域ではプラスだが、善福寺川流域ではマイナスであり物理的に妥当でない結果といえる。また、疎通能力は水害の発生を抑制する要因でありマイナス符号のはずであり、石神井川中流域、神田川上流域、および烏山川流域ではマイナスだが、善福寺川流域ではプラスであり物理的に妥当でない結果といえる。

以上のように、線型判別分析の結果は比較的高い中率を示すが、物理的に妥当でない係数の符号も含む。そこで、次に、物理的妥当性をも満足する判別式を得るために、非線型判別分析を試みる。

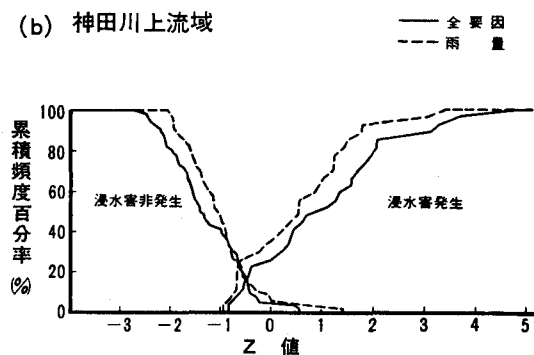
表2 都市水害の発生・非発生に関する線型判別分析の結果

項 目 流域名	サンプル 数(内は 発生数)	選 択 要 因	的中率 (%)	判 別 関 数 の 要 因 別 係 数				
				雨量(中野) a_1	雨量(府中) a_2	疎通能力 a_3	都市化率 a_4	定 数 項 a_0
石神井川中流域	83 (34)	雨 量	75.9	0.0464	0.0488			-1.78
		雨量と疎通能力	75.9	0.0462	0.0471	-0.00632		-1.51
		雨量と都市化率	75.9	0.0459	0.0475		-0.0080	-1.40
		全 要 因	77.1	0.0464	0.0473	-0.00796	0.0038	-1.62
神田川上流域	83 (18)	雨 量	84.3	0.114	0.0514			-2.72
		雨量と疎通能力	88.0	0.113	0.0497	-0.00602		-2.74
		雨量と都市化率	88.0	0.113	0.0506		-0.00009	-2.76
		全 要 因	88.0	0.112	0.0501	-0.00923	0.0141	-3.30
善福寺川流域	83 (27)	雨 量	84.3	0.0677	0.0427			-2.17
		雨量と疎通能力	84.3	0.0659	0.0386	-0.0178		-0.969
		雨量と都市化率	84.3	0.0678	0.0368		-0.00097	3.54
		全 要 因	85.5	0.0692	0.0373	0.0130	-0.139	5.15
烏山川流域	76 (23)	雨 量	76.0	0.0659	0.0385			-1.91
		雨量と疎通能力	79.8	0.0705	0.0354	-0.267		-1.01
		雨量と都市化率	79.8	0.0692	0.0353		-0.127	-6.55
		全 要 因	82.3	0.0698	0.0377	-0.0600	0.229	-9.60

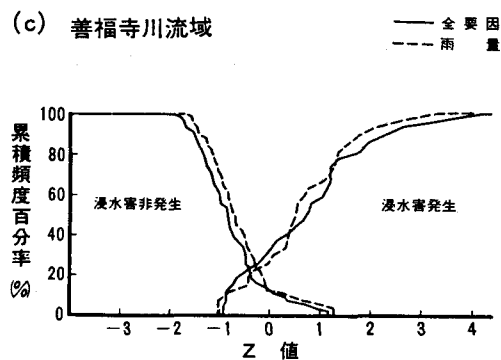
(a) 石神井川 中流域



(b) 神田川上流域



(c) 善福寺川流域



(d) 烏山川流域

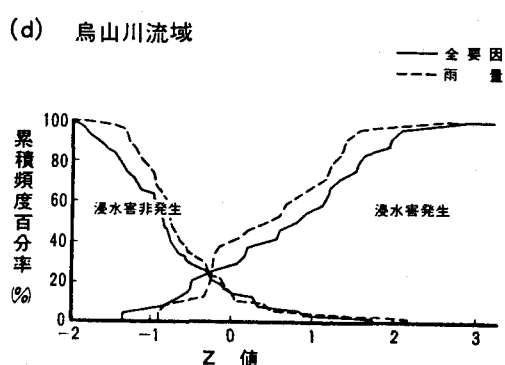


図3 都市水害の発生・非発生に関する線型判別分析結果の累積グラフ

5. 非線型判別分析

(1) 分析の方法

前節をふまえて、次式に示す非線型判別関数を導入した。

$$Z = b_1 \cdot x_1 \cdot x_4 + b_2 x_3 + b_0 \quad \dots \dots \textcircled{6}$$

ただし、 x_1 : 中野における時間最大雨量 (mm/hr), x_4 : 流域の都市化率, x_3 : 河道の疎通能力 (mm/hr)

b_1, b_2 : 係数, b_0 : 定数項, である。

流域の都市化率は、流域の不浸透域面積率と対応すると考えられ、不浸透域面積率は流出率と対応することが示されている¹⁰⁾ので、 $x_1 \cdot x_4$ は(雨量)×(流出率)、すなわち洪水流出量に対応する合成変数と考えられる。⑥式は非線型式であるが、 $x_1 \cdot x_4$ を1変数と置き変えると、線型式となり、前節と同様に計算できる。

(2) 分析結果と考察

表3には、都市水害の発生・非発生に関する非線型判別分析の結果を示す。的中率は表2の全要因の場合の値より若干小さいものもあるが、係数に着目すると、(雨量)×(都市化率)の係数である b_1 の符号がプラスであり、疎通能力の係数である b_2 の符号がマイナスであり、物理的にも妥当な結果が得られた。都市水害の発生・非発生に関する非線型判別分析結果の累積グラフを図4に示すが、浸水害発生と非発生はかなりよく判別されていることがわかる。

(3) 非線型判別式による予測

⑥式に示す非線型判別式を用いて、分析対象期間以後の昭和54年(1979年)から昭和56年(1981年)の3年間を予測期間として、9サンプル降雨を対象として、時間最大雨量、流域の都市化率、および河道の疎通能力を与えて、水害の発生・非発生の予測を行なった。各流域の判別式と判別点Cは次のとおりである。

(a) 石神井川中流域: $Z = 0.224 x_1 \cdot x_4 - 0.0252 x_3 - 0.790$ ($C = -0.20$) $\dots \dots \textcircled{7}$

(b) 神田川上流域: $Z = 0.278 x_1 \cdot x_4 - 0.0232 x_3 - 1.684$ ($C = -0.30$) $\dots \dots \textcircled{8}$

(c) 善福寺川流域: $Z = 0.165 x_1 \cdot x_4 - 0.0272 x_3 - 0.195$ ($C = -0.20$) $\dots \dots \textcircled{9}$

(d) 烏山川流域: $Z = 0.203 x_1 \cdot x_4 - 0.0301 x_3 + 0.165$ ($C = -0.20$) $\dots \dots \textcircled{10}$

ただし、石神井川中流域では x_1 として田無における時間最大雨量を用いた。⑦～⑩の非線型判別式による予測結果を表4に示すが、的中率は88%以上と高く、非線型判別式の予測適用性が示されたといえる。

6. むすび

都市水害の発生・非発生の判別式として、的中率が高く物理的にも妥当な非線型判別式(⑥式)を提示し、その予測適用性も示した。⑥式の判別式は、流域の都市化率と河道の疎通能力が与えられれば、ある降雨によって水害が発生するかないかを判別できる。逆に、計画降雨の場合に水害が発生しないようにするには流域の都市化率と河道の疎通能力をどの程度にすべきか検討できる点で工学的に有用と思われる。

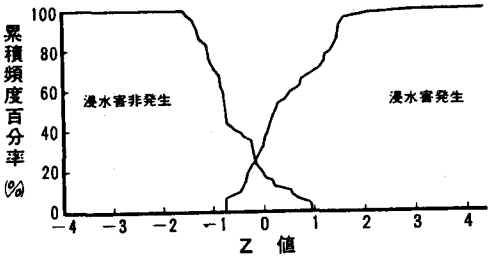
参考文献

- 1) 東京都建設局河川部: 東京の中小河川, 東京都建設局, 1972.
- 2) 高橋裕・安藤義久・田辺敏夫: 東京都の中小河川の浸水害発生特性に関する研究, 災害の研究 第13巻, pp.69~80, 1981.
- 3) 東京都建設局河川部: 東京都水害資料, 1975.
- 4) 東京都建設局河川部: 東京都水害記録, 1969~1978.
- 5) 建設省河川局: 水害統計, 1962~1979.
- 6) 東京都統計年鑑, 1958~1977.
- 7) 東京都建設局河川部: 都市河川の流出特性に関する調査(その1)報告書, 1977.
- 8) 林知己夫・村山孝喜: 市場調査の計画と実際, 日刊工業新聞社, pp.129~132, 1964.
- 9) OS7 H S A P 統計計算ライブラリ 解説書, 日立製作所, 1974.
- 10) 山口高志・松原重昭・山守隆: 都市流出調査 — 降雨損失機構の検討 —, 土木技術資料, Vol.13, No.10, 1971.
- 11) 東京都建設局河川部: 昭和54・55年に於ける水害記録, 1981.
- 12) 東京都建設局河川部: 昭和56年に於ける水害記録, 1982.

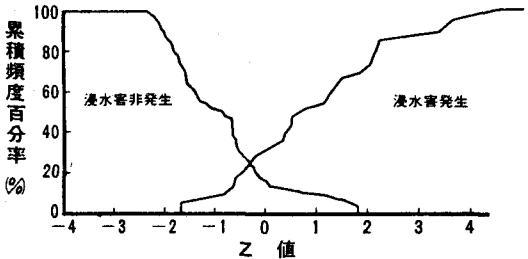
表 3 都市水害の発生・非発生に関する非線型判別分析の結果

項 目 流域名	サンプル 数()内は 発生 数	的 中 率 (%)	判 別 関 数 の 要 因 別 係 数		
			雨量×都市化率 b_1	疎通能力 b_2	定 数 項 b_0
石神井川中流域	83 (34)	77.1	0.224	-0.0252	-0.790
神田川上流域	83 (18)	88.0	0.278	-0.0232	-1.684
善福寺川流域	83 (27)	79.5	0.165	-0.0272	-0.195
烏山川流域	76 (23)	80.5	0.203	-0.0301	0.165

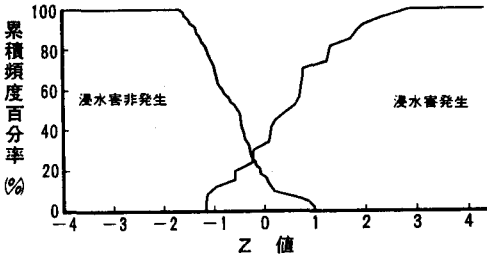
(a) 石神井川 中流域



(b) 神田川上流域



(c) 善福寺川



(d) 田柄川流域

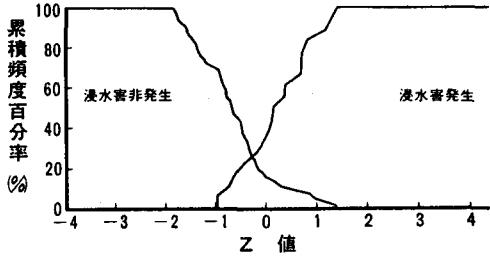


図 4 都市水害の発生・非発生に関する非線型判別分析結果の累積グラフ

表 4 非線型判別式による予測結果

項 目 流域名	サンプル数 ()内は発生数	的 中 率 (%)
石神井川中流域	9 (5)	100
神田川上流域	9 (3)	88.9
善福寺川流域	9 (3)	88.9
烏山川流域	9 (3)	88.9