平 17.都土木技研年報 Annual Report I.C.E. of TMG 2005

8. 神田川における洪水流出特性

Study on Characteristics of Floods in Kanda-Gawa

技術部 高崎忠勝、高橋清

1. はじめに

東京都は1時間に50mmの雨量に対応する治水整備 をすすめてきた。しかし近年において都内各地に設 置されている雨量観測所では1時間に50mmを超える 雨量をしばしば観測している。このことから治水整 備水準の見直しが課題となっている。

本報は、東京を代表する都市中小河川である神田 川の流域における降雨特性及び洪水流出特性につい て、平成16年に東京の中小河川に多くの雨をもたら した9月4日集中豪雨、台風22号、台風23号の3 洪水による解析結果を報告するものである。

2. 雨量観測記録

東京都水防災総合情報システムの雨量観測所について神田川流域の配置状況を図-1に示した。図中、 1~17 の番号を付けた雨量観測所は神田川流域内に 位置する観測所である。

平成 16 年 9 月 4 日集中豪雨(以下、洪水 1)、平 成 16 年台風 22 号(以下、洪水 2)、平成 16 年台風 23 号(以下、洪水 3)における 17 雨量観測所の最大 30 分間雨量、最大 60 分間雨量、最大 180 分間雨量 を図-2 に示した。

洪水1において観測した時間最大雨量は、30分間 に46mm、60分間に69mm、180分間に89mmである。

洪水2において観測した時間最大雨量は、30分間 に39mm、60分間に58mm、180分間に88mmである。

洪水3において観測した時間最大雨量は、30分間 に37mm、60分間に42mm、180分間に60mmである。



図-1 雨量観測所

30 分間雨量の年最大値は、5 箇所の観測所におい て洪水1で記録し、他の観測所は洪水2で記録した。 60 分間雨量の年最大値は、7 箇所の観測所におい て洪水1で記録し、他の観測所は洪水2で記録した。

180分間雨量の年最大値は、4箇所の観測所において洪水1で記録し、他の観測所は洪水2で記録した。

以上のように神田川流域内に位置する雨量観測所 では、年最大雨量を洪水1または洪水2において記 録した。

3. 流域における降雨特性

河川増水に対する降雨の影響を検討するためには 河川流域における降雨の時空間分布を把握する必要 がある。

降雨の空間分布の把握にあたっては東京都水防災 総合情報システムの雨量観測所の1分間データを用 いて500mメッシュ単位の10分間雨量を計算した。



図-2 時間最大雨量

500mメッシュの雨量は図-3に示したように、メ ッシュ周辺の3箇所の雨量観測データを用いて、式 (1)~(5)を用いて計算した。

- $IMR_{A(t)} = r_{A(t)} + 0.5 \times (r_{A(t+1)} + r_{A(t-1)})$ $+ 0.25 \times (r_{A(t+2)} + r_{A(t-2)})$ $+ 0.125 \times (r_{A(t+3)} + r_{A(t-3)}) \cdots (1)$
- IMR_{A(t}): 観測所Aの評価降雨 **r**_{A(t)}: 観測所Aの1分間雨量(mm/分) t :計算対象時刻(分)

Diff=
$$\sum_{t=0}^{x}$$
 (IMR_{A(t)} - IMR_{B(t+TAB})²(2)
IMR_{A(t)} : 観測所Aの評価降雨
IMR_{B(t)} : 観測所Bの評価降雨
TAB : Diffを最小にする時間

t : 計算対象時刻(分) x : 降雨終了時刻(分)

$$W_{An} = \frac{1}{L_{An}^{2}} \cdots (3)$$

 WAn
 : メッシュnに対する観測所Aの重み

 LAn
 : メッシュnと観測所Aの距離

 $T_{An} = \frac{\phi_{CAn} \times T_{AB} \times L_{An}}{(\phi_{BAn} + \phi_{CAn}) \times L_{AB}} + \frac{\phi_{BAn} \times T_{AC} \times L_{An}}{(\phi_{BAn} + \phi_{CAn}) \times L_{AC}} \cdots (4)$

TAn : メッシュnに対する観測所Aの遅れ時間
 LAn : メッシュnと観測所Aの距離
 TAB, TAC: Diffを最小にする時間
 φ BAn, φ CAn: 2観測所とメッシュnの角度
 LAB, LAC: 2観測所間の距離

 $R_{n(t)} = \frac{R_{A(t+T_{An})} \times W_{An} + R_{B(t+T_{Bn})} \times W_{Bn} + R_{C(t+T_{Cn})} \times W_{Cn}}{W_{An} + W_{Bn} + W_{Cn}} \cdots (5)$

 Rn(t)
 : 時刻 t におけるメッシュnの雨量

 RA(t),RB(t),RC(t):
 時刻 t における観測所の雨量

 Wan,WBn,WCn:
 メッシュnに対する観測所の重み



図-3 メッシュ雨量の計算



図-4 3雨量観測所の観測値(洪水1)







図-6 水位観測所

図-4 は局地的集中豪雨である洪水 1 における 3 雨量観測所の観測値を示したものである。式(1)~ (5)は図-4に示したような 3 地点の 1 分間雨量から 強雨域の移動を推定し計算するものである。

雨量観測所が位置するメッシュの雨量について、 周辺観測所の観測値(図-4)から計算した値と観測 値を比較したものを図-5に示した。計算雨量1は 式(1)~(5)により求めた雨量である。計算雨量2は 計算対象メッシュから雨量観測所までの距離の2乗 分の1を重みとして同時刻の雨量を用いて求めた雨 量であり、強雨域の移動を考慮していない。

図-5 下図の雨量観測所 6 においては計算手法に よる計算雨量の差が小さいが、上図の雨量観測所 3 においては計算方法によって計算雨量が大きく異な り、強雨域の移動を考慮した計算雨量 1 が観測雨量 に近い値となっている。複数の雨量観測所の雨量デ ータから強雨域の移動を推定することで降雨の空間 分布をより正確に再現することが可能であることか ら雨量観測データ欠測時等にデータの補完が必要な 場合において有効であると考える。

図-6 に示した 4 地点の水位観測所の上流域を対象に流域平均雨量を算出した。4 地点の水位観測所 の上流域を、久我山橋 13 メッシュ、方南橋 44 メッ シュ、和田見橋 128 メッシュ、田島橋 291 メッシュ で構成すし、流域平均雨量は構成するメッシュの雨 量の平均値とした。解析上の流域面積は久我山橋上 流域 3.25km²、方南橋上流域 11.00km²、和田見橋上流 域 32.00km²、田島橋上流域 72.75km²となる。

4地点の上流域における3洪水時の10分間雨量の 経時変化を図-7 に、降雨強度と継続時間の関係を 図-8に示した。

洪水1は降雨初期にピークがあり強雨の期間は約



図-7 3 洪水時の 10 分間雨量

30 分間である。雨量観測所間で雨量のばらつきが大 きかったが流域面積による流域平均雨量の差は小さ い。洪水 2・洪水 3 は降雨終期にピークがあるのが 特徴であり、強雨の期間は洪水 1 と同様に約 30 分間 である。

洪水1における流域平均の30分間最大雨量は久我 山橋上流域5.0mm、方南橋上流域11.3mm、和田見橋 上流域12.3mm、田島橋上流域16.8mmであり、60分 間最大雨量は久我山橋上流域8.3mm、方南橋上流域 19.3mm、和田見橋上流域19.3mm、田島橋上流域 27.4mmであり、180分間最大雨量は久我山上橋流域 18.5mm、方南橋上流域33.1mm、和田見橋上流域 30.7mm、田島橋上流域45.2mmであった。

4 流域において流域面積が最も小さい久我山橋上 流域の雨量が他の3流域と比べて小さかった。これ は強雨域が久我山橋上流域にかからなかったためで



図-8 3洪水の降雨強度

ある。

洪水2における流域平均の30分間最大雨量は久我 山橋上流域21.5mm、方南橋上流域29.0mm、和田見橋 上流域26.4mm、田島橋上流域27.3mm であり、60分 間最大雨量は久我山橋上流域32.0mm、方南橋上流域 40.8mm、和田見橋上流域38.2mm、田島橋上流域 40.9mm であり、180分間最大雨量は久我山橋上流域 62.6mm、方南橋上流域71.6mm、和田見橋上流域 68.0mm、田島橋上流域69.4mm であった。

洪水3における流域平均の30分間最大雨量は久我

山橋上流域 13.3mm、方南橋上流域 17.7mm、和田見橋 上流域 14.6mm、田島橋上流域 18.2mm であり、60分 間最大雨量は久我山橋上流域 21.4mm、方南橋上流域 24.9mm、和田見橋上流域 23.1mm、田島橋上流域 24.8mm であり、180分間最大雨量は久我山橋上流域 48.7mm、方南橋上流域 51.9mm、和田見橋上流域 49.2mm、田島橋上流域 51.0mm であった。

4 地点上流域における流域平均雨量の年最大値は 洪水2において発生している。

4. 神田川の流出特性

4 地点における 3 洪水時の流域平均雨量と水位の 時間変化を図-9~12 に示した。

各地点上流域の流域平均雨量の10分間雨量最大

値を記録してから最大水位に達するまでの時間を 洪水 1、洪水 2、洪水 3 の順に示すと、久我山橋は 30 分、50 分、10 分であり、方南橋は 90 分、0 分、 10 分、和田見橋は 80 分、10 分、10 分、田島橋は 10 分、20 分、10 分である。

洪水によってばらつきはあるものの4地点において 10分間雨量の最大値を記録してから最大水位発 生までの時間は概ね 10分であり流域面積による差 はみられない。

10分間あたりの最大水位上昇を洪水1、洪水2、洪 水3の順に示すと、久我山橋は34cm、24cm、22cmで あり、方南橋は39cm、30cm、64cm、和田見橋は68cm、 51cm、62cm、田島橋は104cm、87cm、104cmであり急 激に水位上昇することがわかる。



4 地点の流出特性を式(6)~(9)による流出モデル により解析をおこなった。

- $Q_{(t)} = \sum_{i=1}^{n} Ki_{(t)} \times REi_{(t-T_i)} \times Ai) \cdots (6)$
 - Q(t) : 時刻tにおける流域最下流地点の洪水流出量
 - n : 流域を構成するメッシュ数
- REi(t): メッシュiにおける時刻tの有効雨量
- Ti : メッシュiに降った雨が流域最下流地点に到達するのに 要する時間(到達時間)
- Ki : 到達時間Tiが代表する比率(到達時間係数)
- Ai : メッシュiが有する面積

 $REi(t) = Ri(t) - RLi \cdots (7)$

- REi(t): 時刻tにおけるメッシュiの有効雨量 Ri(t): 時刻tにおけるメッシュiの雨量
- RLi : メッシュiにおける損失雨量







図-11 3洪水時の雨量水位(和田見橋)

- Ti=Timin+a×REi^{-b} ···(8) Ti : メッシュiの到達時間 Timin: メッシュiの最小到達時間 REi(t): 時刻tにおけるメッシュiの有効雨量 a,b: 有効雨量による到達時間変化を表す係数
- $q_{(t)} = A \times (H_{(t)} B)^2 q_0 \cdots (9)$
 - q(t):時刻tにおける水位観測地点の洪水流出量
 - H_(t):時刻tにおける水位観測地点の水位
 - qo : 基底流量
 - A,B: 水位流量曲線の係数

式(6)は地表面が有する到達時間の組み合わせに よる流域最下流の流出量、式(7)は合流式下水道によ る損失、式(8)は降雨の強さによる到達時間の変化、 式(9)は観測水位に対応する流出量を示す。



図-12 3洪水時の雨量水位(田島橋)



図-13 流量と平均流速の関係

式(6)の到達時間Ti、到達時間係数Ki、式(7)の損 失雨量 RLi、式(8)の最短到達時間Timin、係数 a、b、 式(9)の水位流量曲線の係数 A、B がパラメータであ る。式(6)による雨量から求めた流出量と式(9)によ る水位から求めた流出量を等しくするパラメータは 遺伝的アルゴリズムを用いることで容易に求めるこ とが可能である。以下にモデルの考え方を示す。

図-13 に平成 16 年流量観測結果より求めた流量 と平均流速の関係を示した。流量の増加に伴い平均 流速は大きくなるが、流量が大きくなると平均流速 は一定の値に収束する。よって河道内の流下時間は 平均流速によって変化するが流量が大きくなると固 有の時間となる。



下水道内においても流量の増加に伴って流速が一 定になる特性があると考えると、地表面に降った雨 が流域最下流に到達するのに要する時間である到達 時間は、都市中小河川では下水道及び河川の流下時 間が支配する。各地表面に降った雨は地表面が有す る到達時間後に流域最下流点に到達する。各時刻に おいて各地表面から到達する流出量を全地表面につ いて合計したものが流域最下流点の流出量となる。

このモデルの特徴は、降雨を分布型モデルとする ことで、広範囲に一様な降雨をもたらす台風や局地 的な豪雨等の多様な降雨特性の洪水流出を1組のパ ラメータで良好に再現できる点と、流出を集中型モ デルとすることで、取り扱いが容易な点である。

図-14~17に3洪水時の雨量と水位から求めたパ

ラメータによる再現結果を示した。流域面積が小さ くなると再現性が低下するが、4 地点の上流域で最 も面積が小さい久我山橋においても3 洪水の水位波 形変化及び最大水位を良好に再現している。

式(8)の最小到達時間は流量が大きいときの到達 時間を示すことから、最小到達時間の組み合わせは 豪雨時の流出特性を示す。

12時間以内の最小到達時間を有する流域面積Aに 対する特定時間内の最小到達時間を有する流域面積 aの比率 a / Aを到達率、10分間あたりの到達率の 変化量を時間到達率として豪雨時の流出特性をあら わしたものを図-18に示した。

到達率は到達時間の増加とともに上昇するが、到 達時間の増加とともに到達率の増加量は小さくなる。





到達率の分布状況から洪水流出に大きく影響する 降雨継続時間を到達率80%における継続時間と考え ると、久我山橋は60分、方南橋は100分、和田見橋 は130分、田島橋は170分であり、流域面積とともに 大きくなっている。

流域平均雨量の最大値を記録してから最大水位を

観測するまでの時間が4地点において概ね10分程度 であった要因は、4地点の10~20分における時間到 達率が大きいことによる。

以上から4地点の流出特性を整理すると、久我山 橋は上流域に60分以内に降った雨が洪水流出に大 きく寄与し、強雨の20分後に最大水位を発生しやす い。方南橋は上流域に100分以内に降った雨が洪水 流出に大きく寄与し、強雨の10分後に最大水位を発 生しやすい。和田見橋は上流域に130分以内に降っ た雨が洪水流出に大きく寄与し、強雨の10分後に最 大流量を発生しやすい。田島橋は上流域に170分以 内に降った雨が洪水流出に大きく寄与し、強雨の10 分後に最大流量を発生しやすい。

田島橋においては 180 分以内の降雨強度が洪水 1 と洪水 3 で大きな違いがないにもかかわらず最大水 位は洪水 3 が大きな水位となっている。洪水 1 の最 大流出量は強雨時の降雨からの流出のみであるが、 洪水 3 の最大流出量は到達時間が短い強雨時の降雨 からの流出と到達時間の長い強雨前の降雨からの流 出が合わさったものとなっている。

局地的集中豪雨は強雨前の降雨が少ないことから、 短時間の降雨強度が台風と同規模であっても河川増 水への影響は台風より小さい。

5. 確率雨量

平成6年から平成16年の11年間の降雨データを 用いて地点雨量及び流域平均雨量による確率雨量を 計算した。

地点雨量は雨量観測所1と雨量観測所3の2地点 を対象とし、流域平均雨量は流出特性を検討した4 地点の上流域を対象とした。

確率分布は、指数分布、ガンベル分布、平方根指 数型最大値分布、一般化極値分布、対数ピアソン III 型分布、岩井法、石原・高瀬法、対数正規分布によ る計算をおこなったが、図-19 に示した指数分布、 ガンベル分布、一般化極値分布の3分布の適応度が 高かった。一般化極値分布については全てのケース において適応度が高いことから一般化極値分布を採 用した。

図-20に確率雨量による降雨強度曲線を示した。



図-19 確率分布の適応度



雨量観測所 1 の 60 分間雨量は、44.5mm (確率年 1/2)、52.0mm (確率年 1/3)、59.9mm (確率年 1/5)、 69.0mm (確率年 1/10) であり、雨量観測所 3 の 60 分間雨量は 47.9mm (確率年 1/2)、54.1mm (確率年 1/3)、60.5mm (確率年 1/5)、67.8mm (確率年 1/10) である。

2 地点を比較すると 10 分間雨量に差がみられるが、 30~180 分間雨量では大きな差はなかった。

久我山橋上流域の 60 分間雨量は 33.2mm (確率年 1/2)、37.1mm (確率年 1/3)、41.8mm (確率年 1/5)、 48.5mm (確率年 1/10) であり、方南橋上流域の 60 分間雨量は 34.4mm (確率年 1/2)、37.9mm (確率年 1/3)、42.2mm (確率年 1/2)、37.9mm (確率年 1/3)、42.2mm (確率年 1/5)、48.6mm (確率年 1/10) であり、和田見橋上流域の 60 分間雨量は 31.2mm (確 率年 1/2)、34.0mm (確率年 1/3)、37.6mm (確率年 1/5)、43.1mm (確率年 1/10) であり、田島橋上流域 の 60 分間雨量は 31.6mm (確率年 1/2)、35.9mm (確 率年 1/3)、40.4mm (確率年 1/5)、45.7mm (確率年 1/10) である。

流域平均雨量による確率雨量は、2 地点の確率雨 量と比べて小さな値である。また、流域面積の増加 による確率雨量の変化は少ない。

6. 河川増水に対する降雨の評価

神田川流域内に位置する複数の雨量観測所におい て平成16年の60分間雨量の最大値を洪水1で観測 したが流域平均雨量の最大値は洪水2で記録してい る。

局地的集中豪雨は狭い範囲に極めて強い雨を降ら すことから、強雨域に位置した雨量観測所は年最大 値をこのときに記録する。しかし、強雨域は流域の 一部だけであることが多く、流域全体に対する雨量 はより小さい雨量しか観測していない台風時より小 さくなることもある。

よって1地点の観測記録から求めた確率雨量は河 川増水への影響を正しく反映していない可能性があ る。

近年11年間の降雨を対象に計算した2地点の確率 雨量については、現在の河川計画で用いている60分 間雨量50mmに相当する確率年が1/2~1/3であり、 現在の河川計画と大差ない値を得た。一方、4 地点 上流域の確率雨量については、60 分間雨量 50mm に 相当する確率年が 1/10 程度であり、地点雨量による 確率雨量より小さな値である。

以前の河川改修水準の 60 分間雨量 35mm に相当す る確率年が流域平均雨量では 1/2~1/3 であること、 50mm 改修の進捗に伴い河川溢水の頻度が大幅に低減 していることを考えると、流域平均雨量をもとに計 算した確率雨量が河川増水に及ぼす影響を正確に反 映していると考える。

なお、河川計画の見直しや事業の評価をおこなう ためには、更に過去の降雨についてもデータの精査 をおこない充分な統計期間を確保した上で確率雨量 を計算する必要がある。

7. まとめ

(1) 平成 16 年の降雨記録

神田川流域内の雨量観測所において短時間雨量の 年最大値を観測したのは9月4日集中豪雨時であり、 1時間に69mmの雨量を観測した。

神田川の増水に最も影響を及ぼした降雨は台風22 号によるものであった。

(2) 降雨が河川増水に及ぼす影響

降雨が河川増水に及ぼす影響を正確に反映するた めには流域平均雨量をもとに確率雨量を算定するこ とが必要である。

今後、河川計画の見直しや事業の評価に使用する 確率雨量を求めるため、過去の雨量データを精査し 充分な統計期間を確保することが課題である。

流域平均雨量の算定に際して必要となる流域の降 雨分布の計算については、複数の雨量観測所のデー タをもとに強雨域の移動を考慮することでより正確 に再現することが可能である。

(3) 神田川の流出特性

久我山橋は上流域への60分以内の降雨、方南橋は 上流域への100分以内の降雨、和田見橋は上流域へ の130分以内の降雨、田島橋は上流域への170分以 内の降雨が洪水流出に大きく寄与する。いずれの地 点においても強雨の10~20分後に最大流量を発生 しやすい流出特性を有しており、流域面積が大きく なっても増水に要する時間には大きな差がない。

短時間の降雨強度が同規模の場合、河川増水への 影響は台風の方が局地的集中豪雨より大きい。

到達時間の組み合わせによる流出モデルは1種類 のパラメータで、台風及び集中豪雨時の神田川の洪 水流出を良好に再現した。パラメータの算出は雨量、 水位データを用いて自動的におこなうことから流出 特性把握の他に水位予測計算等に活用できるものと 考える。

参考文献

- 1)高崎忠勝、土屋十圀、増田信也(2005):遺伝的アルゴリズムを用いた都市中小河川の水位予測、水工学論文集第49巻、 451-456
- 2) 高崎忠勝(2004): 東京都内における降雨特性の解析、平 16. 都土木技研年報、153-160
- 3) 高崎忠勝(2003):等雨量線表示システムの概要、平15. 都土木技研年報、379-382
- 4) 谷岡康、福岡捷二(2004):都市域の治水計画における降雨外力について、河川技術論文集、第10巻、31-36
- 5) 谷岡康、福岡捷二、谷口将俊、小山幸也(1998):都市中小河川の洪水流出特性、土木学会論文集 No. 586/ II-42、1-12
- 6)谷岡康、福岡捷二、伊藤繁之、小山幸也、傳雲飛(1998):都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の特性、土木 学会論文集 No. 579/Ⅱ-41、29-45
- 7)谷岡康、福岡捷二、傳雲飛(1996):都市中小河川流域規模を対象とした地上雨量計による短時間雨量の変動予測、水工 学論文集第40巻、140-144
- 8) 荒川英誠・宝馨 (2005): 全国における確率降雨強度式の現状と作成方法に関する一考察、水工学論文集第 49 巻、19-24
- 9)陸旻皎,小池俊雄,早川典生(1989):分布型水文情報に対応する流出モデルの開発、土木学会論文集 No.411/II-12、 135-142
- 10)田中丸治哉(1993):遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定、京都大学防災研究所年報第36号、231-239
 11)土木学会(1999):水理公式集 平成11年版、35-47