

都市中小河川善福寺川の降雨流出特性が 親水利用に及ぼす影響

高崎 忠勝¹・河村 明²・天口 英雄³・石原 成幸⁴

¹正会員 東京都土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

E-mail:takasaki-tadakatsu1@tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:kawamura@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:amaguchi@tmu.ac.jp

⁴正会員 東京都建設局河川部 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

E-mail:ishihara-shigeyuki@tmu.ac.jp

本論文は、都市域における中小河川の親水利用に向けて、急な大雨に対する河川増水初期の流出特性を検討したものである。大都市で普及している合流式下水道の流出特性を適切に表現するため、都市貯留関数モデルを用い、東京都区部に位置する中小河川善福寺川を対象に、10洪水のデータをもとに降雨流出特性を解析し、増水初期において退避行動が可能な時間を検討した。また、今後予定されている下水道施設の整備により初期雨水が貯留された場合についても同様の検討を行い、流出特性の変化が親水利用に及ぼす影響について考察した。

Key Words : *urban runoff, river recreation, combined sewer system, storage function model, storm rainfall*

1. はじめに

今後の都市の再構築においては、治水機能、防災機能、環境空間、都市活動を支える空間としての役割を有する河川と沿川地域が一体となってまちづくりを進めていくことが望まれている。都市域にとって貴重な自然空間である河川には、水とふれあえる機会の創出はもとより環境モニタリングや環境教育のフィールドとして活用されることによって、地域住民との接点を持つことが期待されている¹⁾。また、こうした河川を中心としたまちづくりは日本だけではなく、韓国ソウル市の清溪川復元事業や中国上海市の蘇州河再生事業等、海外でも様々な取り組みが行われている²⁾。

これまで治水上の安全性向上が急務の課題であった東京都の中小河川では、深く掘り込まれたコンクリート護岸による整備が行われてきたが、最近では遊歩道として管理用通路を整備することや緩やかな傾斜の護岸整備等により人々が水辺に近づける工夫が行われている³⁾。さらに、都市域においても中小河川をフィールドにした地域住民の活動が行われて

いる。例えば、杉並区⁴⁾では善福寺川において探鳥会や自然観察会等の区民参加の活動を行ったり、小学校による川の生き物調査等を行い、子供が川と接する機会を創出している。

一方で、中小河川の親水利用に際しては急な大雨によって生じる急激な増水による事故の発生が危惧される。2008年には、東京都の呑川において作業中の男性が流され1名死亡し、兵庫県の都賀川では親水利用の児童らが流され5名死亡する事故が発生している⁵⁾。河川の親水利用の危険度について戸田ら⁶⁾は山地部の流出解析と親水域の平面二次元氾濫解析によって評価を行っている。流域面積が小さく河道内での親水利用が想定される都市中小河川においても増水に対する危険度を十分に把握する必要があると考える。

多くの大都市では合流式の下水道が普及している。合流式下水道は一定量以上の降雨があると雨水で希釈された汚水の一部が雨水吐から河川へ放流されるため、河川増水をより適確に把握するには合流式下水道の流出特性を考慮する必要がある。また、東京都の都心部を流れる神田川における雨天時水質⁷⁾にみ

られるように合流式下水道は大雨時に河川水質に大きな影響を及ぼす。このため東京都では降雨初期の下水を貯留する貯留管等の整備を進めており、長期的には放流水質を分流式下水道と同程度に改善していくとしている⁸⁾。こうした合流式下水道の流出特性の変化は河川増水の初期に大きく影響を及ぼすと考えられる。

こうした背景の下、本研究では合流式下水道が普及している都市域の中小河川を対象に降雨流出解析を行い、河川増水初期の水深、流速をもとに退避行動が可能な時間を算定する。また、下水道施設の整備により初期雨水が貯留された状況に対しても同様の計算を行い、安全に都市中小河川を親水利用するために考慮すべき退避時間について考察する。

2. 対象地点

本研究では東京都の区部に位置し河道内での親水活動が行われている善福寺川を対象とする。善福寺川は杉並区の善福寺池に源を持ち、同区内で神田川に注ぐ延長約10.5kmを有する荒川水系の一級河川である。善福寺川流域を含む神田川流域全域では市街化が進んでおり、田畑、森林、空地、公園、水面等の自然地在流域全体に占める割合は1割以下となっている。

検討地点は図-1に示す松見橋付近であり、流域面積は約12km²である。高水流量観測を2008年に実施しており、増水時の流量データが存在している。また、近くには東京都水防災総合情報システム⁹⁾の松見橋水位観測所が位置しており、1分間隔で水位を記録している。

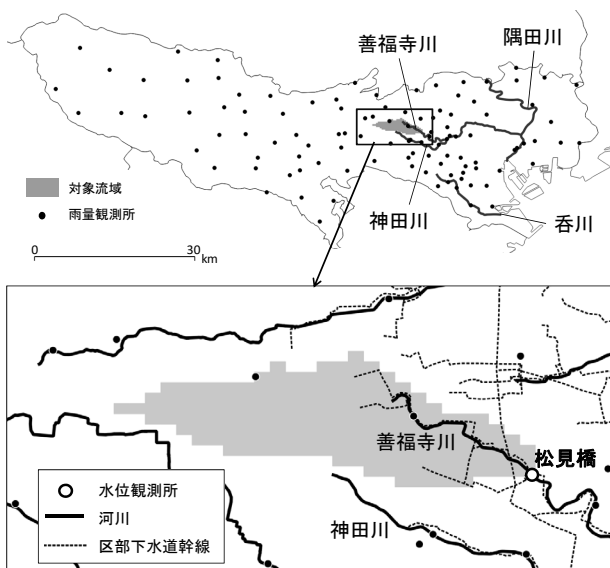


図-1 対象地点

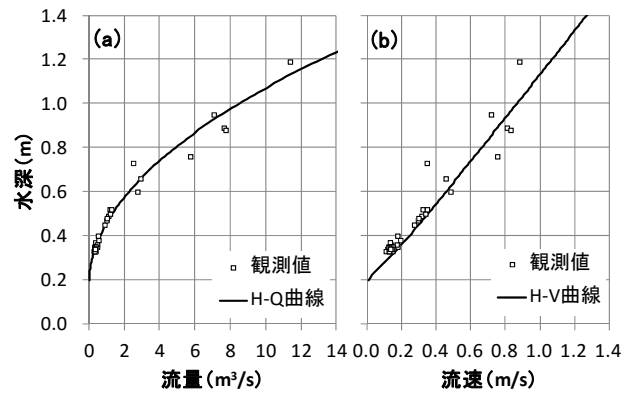


図-2 水深と流量・流速

河川整備においては50ミリ計画の護岸改修が完了しているが、下流側が未整備であることから対象地点を含む上流側では、河床を下流の流下能力に見合った高さとしている。今後、下流側の整備にあわせて流下能力の向上を図るとともに可能な範囲で動植物の生息・生育・繁殖環境に配慮した整備を行うこととなっている¹⁰⁾。

検討地点の左右両岸はコンクリート護岸であり矩形に近い断面形状となっている。善福寺川では水辺へのアクセスに配慮した堤防整備も行われているが、こうした整備延長は短いため、河道内で親水活動を行う場合は、検討地点のような断面での安全性が問題となる。

水深と流量の関係を図-2(a)に、水深と流速の関係を図-2(b)に示す。なお、本論文において水深は最深河床高に対する水深を表し、流速は平均流速を表すものとする。2008年11月28日と12月9日に行われた浮子による流量観測における観測値の最大は水深1.19m、流量11.4m³/s、流速0.88m/sである。図中に示したH-Q曲線は流量観測において観測した流量と水深の関係を二次式で表したものであり、H-V曲線の流速はH-Q曲線による流量を流積で除して求めている。

3. 降雨流出特性

合流式下水道をはじめとした都市流域の流出機構を考慮した集中型概念モデルである都市貯留関数モデル¹¹⁾ (以下、USFモデル) は、式(1)~(4)で表される。

$$s = k_1(Q+q_R)^{p_1} + k_2(d/dt)(Q+q_R)^{p_2} \quad (1)$$

$$ds/dt = R + I - E - O - Q - q_R - q_l \quad (2)$$

$$q_l = \begin{cases} k_3(s-z) & (s \geq z) \\ 0 & (s < z) \end{cases} \quad (3)$$

$$q_R = \begin{cases} \alpha(Q+q_R-Q_o) & (\alpha(Q+q_R-Q_o) < q_{Rmax}) \\ q_{Rmax} & (\alpha(Q+q_R-Q_o) \geq q_{Rmax}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 s ：総貯留高(mm)， t ：時間(min)， Q ：河川流出量(mm/min)， q_R ：合流式下水道による流域外への雨水排水量(mm/min)， q_{Rmax} ：最大雨水排水量(mm/min)， q_l ：地下水関連損失量(mm/min)， I ：都市特有の流入量・流域外からの地下水流入(mm/min)， E ：蒸発散量(mm/min)， O ：取水量(mm/min)， Q_o ：初期河川流出量(mm/min)， α ：下水道排出係数， z ：浸透孔高(mm)， k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 ：モデルパラメータ。

河川流出量 Q と合流式下水道による流域外への雨水排水量 q_R の合計を流域からの流出量と考え、流域からの流出量 $(Q+q_R)$ と総貯留高 s の関係を式(1)で表す。また、その連続の式を式(2)で表す。伏流水や地下水等として流域外へ流出する水量である地下水関連損失量 q_l を式(3)で表す。また、流域からの流出量 $(Q+q_R)$ と q_R の関係を図-3のように線形と仮定すると図-3の関係は式(4)で表される。USFモデルにおける同定すべき未知パラメータは $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, z, \alpha$ の7個である。

表-1に示す10イベントを対象に降雨流出特性を検討する。イベントA, Bは流量観測を実施した洪水である。パラメータの妥当性を確認するために用いることとしパラメータ同定には使用しない。イベント1~8はパラメータ同定に用いた洪水である。観測流量の算定に二次式のH-Q曲線を用いることから実測流量の最大値を超えない規模の洪水を流量観測を実施した年から選定している。10イベントの60分最大降水量は10mm未満であり、計画降雨で想定している時間50mmと比べて小さい規模の降雨である。また、イベント5は総降水量と30分最大降水量がほとんど一致しており、極めて短時間の強雨イベントとなっている。

パラメータ同定に用いる観測流量は松見橋水位観測所の水位データと図-2に示したH-Q曲線を用いて1分単位で算定した。また、流域平均雨量は図-1に示したように解析地点の上流域およびその周辺に位置する東京都水防災総合情報システムの雨量観測所のデータを用いてティーセン法によって計算した。

合流式下水道による流域外への最大雨水排水量 q_{Rmax} は流域外に接続する下水道の流下能力をマンニング式により算定した $1.84\text{m}^3/\text{s}$ ($0.0092\text{mm}/\text{min}$)から家庭からの汚水量等を下水処理場の計画汚水量をもとに推定した $1.50\text{m}^3/\text{s}$ ($0.0075\text{mm}/\text{min}$)を差し引いた $0.34\text{m}^3/\text{s}$ ($0.0017\text{mm}/\text{min}$)とした。対象流域にお

ける降水量以外の流入成分 I は2008年度の水位データの最小値に相当する流量 $0.22\text{m}^3/\text{s}$ ($0.0011\text{mm}/\text{min}$)とし、取水量 O および蒸発散量 E はともに $0\text{m}^3/\text{s}$ ($0\text{mm}/\text{min}$)とした。モデルパラメータについては、大域的探索法であるSCE-UA法¹³⁾を用いて同定した。この際にイベント1~8を一連イベントとして扱った。また、低水部の適合度を重視して式(5)のRR (Root Mean Square of Relative Error)を誤差評価関数¹²⁾とした。得られたパラメータをイベントA, Bに適用し、近年、モデルの適合性判定に多く用いられている式(6)のNS (Nash-Sutcliffe指標)により同定値の妥当性を確認した。パラメータの探索範囲および同定値を表-2に示す。

$$RR = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})^2}{Q_{oi}^2}} \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum (Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

ここに、 Q_{oi} ：時刻 i における観測流量， Q_{ci} ：時刻 i における計算流量， N ：データ数。

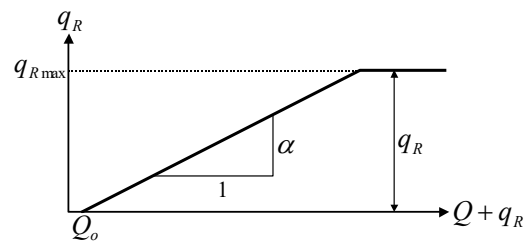


図-3 流域からの流出量と q_R の関係

表-1 対象イベント

イベント	時刻	降水量 (mm)		
		30分最大	60分最大	総降水量
A	2008/11/27~11/28	4.9	8.6	26.1
B	2008/12/9~12/10	3.4	5.6	20.1
1	2008/5/14	2.5	4.5	13.4
2	2008/5/29	3.8	6.4	36.5
3	2008/6/12	4.9	7.0	22.7
4	2008/8/21	5.5	5.7	5.8
5	2008/8/28	9.1	9.1	9.1
6	2008/9/4~9/5	2.8	4.4	8.2
7	2008/10/5~10/6	4.0	6.6	31.0
8	2008/10/7~10/8	3.0	4.9	20.0

表-2 パラメータの探索範囲と同定値

パラメータ	探索範囲	同定値
k_1	10 ~ 500	23.26
k_2	100 ~ 5000	1252
k_3	0.001 ~ 0.05	0.02
p_1	0.1 ~ 1	0.73
p_2	0.1 ~ 1	0.10
z	0.1 ~ 50	0.10
α	0.1 ~ 1	0.63

パラメータ同定値によるハイドログラフを図-4に示す。計算では雨量は1分単位のデータを使用しているが、図においては流量との関係が分かりやすい10分値を示している。イベントA, BのNash-Sutcliffe指標の値はそれぞれ0.96, 0.98であり、河川流量の計算値 Q はピークを含めて期間全体を通じて観測流量を良好に再現している。このことから同定パラメータは対象地点の流出特性を表すとともにUSFモデルで考慮している合流式下水道の特性は妥当であると判断した。

図-5に合流式下水道による雨水排水量の計算値 q_R の変化を示す。河川流量の計算値 Q が $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲において q_R の値が変化しており、増水初期の流量変化に対して合流式下水道が影響を及ぼすものと考えられる。

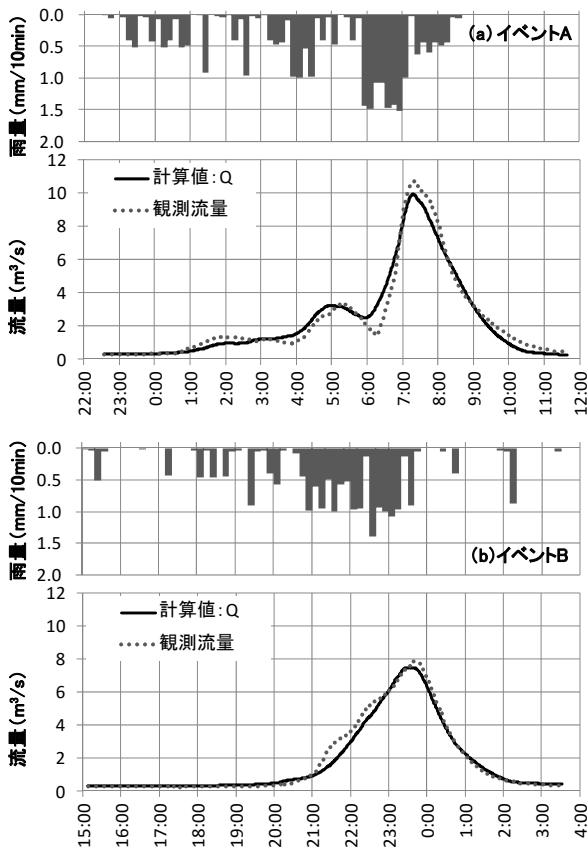


図-4 パラメータ同定値によるハイドログラフ

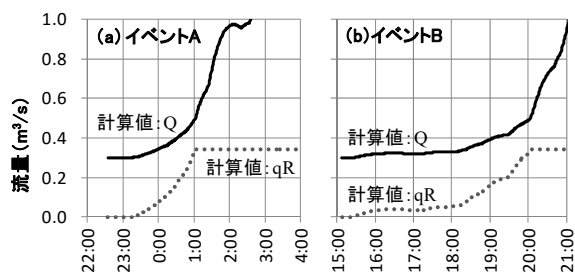


図-5 合流式下水道による雨水排水量

4. 親水利用時の安全性

都市域の中小河川では用地の問題から、堤内地と河川水面を結ぶ階段やスロープは左右岸のいずれかのみを設置されることが多く、また、縦断的にも設置される場所は限られる。このため、親水活動中に河川が短時間に増水すると場所によっては堤内地への退避が難しくなると考えられる。そこで、河川増水初期における退避行動の可能性について検討する。

須賀ら¹⁴⁾は子供を含む水中歩行実験により、水深約1m、流速約1m/sが歩行の限界であることを示している。また、浸水想定区域の手引き¹⁵⁾には避難行動が可能な水深・流速の目安として、成人男子では水深が腰以下のときに流速0.5m/s以下であることが示されている。これらを考慮して子供も含めて水深が腰以下のときに流速0.5m/s以下が退避行動可能として検討を進める。図-2のH-V曲線を見ると水深1.0mに相当する流速は0.87m/sであり0.5m/sを上回っている。流速0.5m/sに相当する水深は0.65mであり、このときの流量をH-Q曲線から判断すると $2.83 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。よって、対象地点で大人が親水利用する場合、流速0.5m/s、水深0.65m、流量 $2.83 \text{ m}^3/\text{s}$ を上回ると退避行動が困難になる。ここでは、流量が $2.83 \text{ m}^3/\text{s}$ に達するまでの時間を退避可能時間とし、親水活動時の降雨に対して退避行動が可能な時間を検討する。

河川をフィールドにした活動は多くの小学校で行われており、小学生の親水利用に対する安全性の検討が望まれる。小学生の腰の高さについては、7歳の平均および9歳の5パーセンタイル値が概ね0.7mである¹⁶⁾。このことから小学生による親水利用を考える場合の水深の目安は0.7mになるが、対象地点における大人を対象とした水深0.65mを上回る。よって小学生についても大人同様に退避行動可能な目安は流速0.5m/s、水深0.65m、流量 $2.83 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。

レーダーや上流域の雨量計等の降雨情報を定期的に入手できる場合は、降雨開始からの退避可能時間が問題になるが、降雨情報を得られない状況で親水活動をしている場合、流域に雨が降り始めた時点では流速や水深の変化は小さく、増水を認識することは難しい。このため、流速や水深がある程度大きくなった段階で増水を意識すると思われる。角道ら¹⁷⁾による河川での子供の親水活動の分析によると、水深0.3m以上の範囲においては水深が0.1m異なると選好性に大きな違いがあることが示されている。対象箇所では平水時の水深が0.3m以上であることから、降雨開始後に水深が0.1m大きくなった時点では河川の増水に気付くものとした。なお、平水時の水深が0.3mより小さい場合、流速も考慮して河川の増水を

察知する時点を設定することが考えられる。

雨の強さによる河川増水の違いを把握するため降雨強度を一定とした雨量に対する河川流量を計算する。パラメータは表-2に示した値とし、初期河川流出量は表-1のイベントの中で最も大きい $0.58\text{m}^3/\text{s}$ と設定し、他の条件はパラメータ同定時と同様とする。

図-6に降雨強度と退避可能時間の関係について表-1のイベントおよび降雨強度一定の場合を示す。図-6(a)のイベントの降雨強度は降雨開始から退避行動が困難になるまでの期間における平均降雨強度を示し、図-6(b)のイベントの降雨強度は河川増水に気付いてから退避行動が困難になるまでの期間における平均降雨強度を示す。イベント4, 6は安全に退避行動ができる範囲での増水となった。図をみると各イベントの結果は、降雨強度を一定とした雨量に対する河川流量から得られた曲線の周辺に分布している。

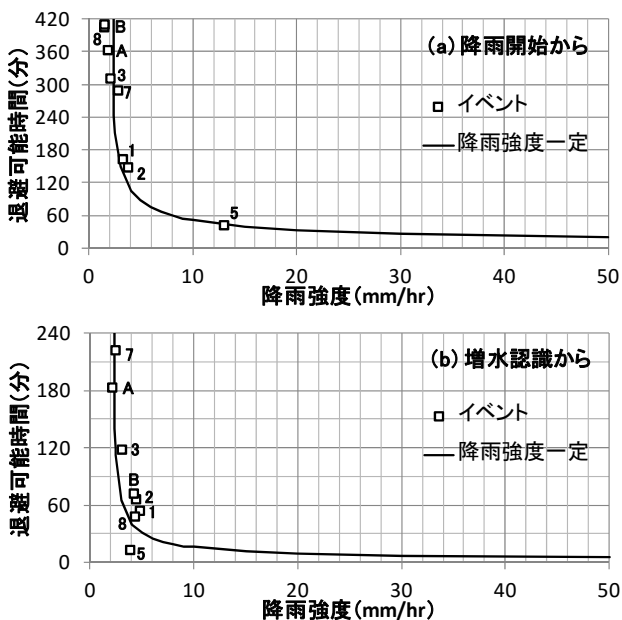


図-6 降雨強度による退避可能時間の変化

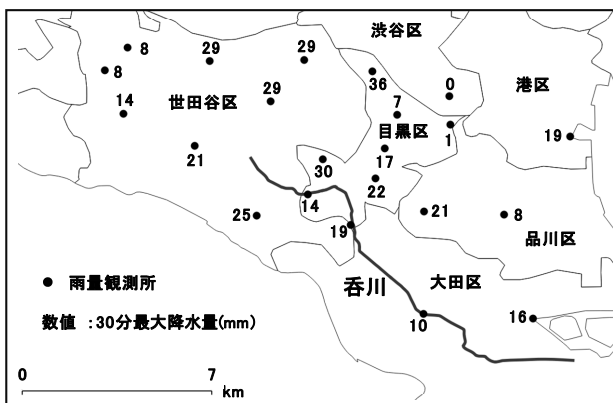


図-7 2008年7月8日の呑川周辺の30分最大降水量

降雨強度一定としたときの曲線をもとに親水利用時の退避可能時間について検討する。降雨強度が 2.3mm/hr 以下では安全に退避行動ができる範囲の増水となる。降雨強度が $2.4\sim 5\text{mm/hr}$ の範囲では、降雨強度の増大に対して退避可能時間は大幅に短くなる。さらに降雨強度が大きくなると、降雨強度の増大に対する退避可能時間の変化は小さくなる。

東京都の呑川で増水による事故があった2008年7月8日について東京都水防災総合情報システムの雨量観測所による30分最大降水量を図-7に示す。呑川上流域において30分間に $20\sim 30\text{mm}$ の降水量となっている観測所が多くみられる。この降雨を考慮すると、降雨継続時間30分程度の強雨に対する降雨強度は概ね 50mm/hr となる。降雨強度 50mm/hr の退避可能時間をみると、降雨開始から20分、増水に気付いてから5分になり、この時間が対象地点で安全な親水活動を行う際の目安になると考える。なお、親水活動に際しては地点によって退避可能時間が異なることが予想されるため、事前に同様の検討を活動予定箇所で行うことが望まれる。

雨が降り始めてから退避が困難になるまでの時間が約20分であることを考慮すると、安全に親水活動が行うためには10分以下の間隔で情報が更新される降雨情報を利用することが望まれる。また、河川増水に気付いたら速やかに堤内地への退避を行えるよう学校等での河川学習¹⁸⁾が重要だと思われる。

5. 貯留施設整備による流出特性の変化

東京都では流域平均 8mm 相当の初期雨水の貯留に向けて雨水貯留施設の整備や雨量監視等による排水システム制御の技術開発を進めている¹⁹⁾。流域平均雨量に対して降雨開始から貯留量に相当する雨量を差し引いて10イベントの降雨流出計算を行い、初期雨水貯留による河川流量の変化を推定する。パラメータは表-2に示した値とし、貯留容量は 2mm , 4mm , 8mm を設定する。

イベントA, Bのハイドログラフを図-8に示す。2つのイベントについてみると貯留容量が大きくなってもピーク流量の違いは小さい一方で増水初期の流量変化は大きく異なっており、貯留施設整備による流出特性の変化は親水利用に対して影響が大きい。

貯留容量による退避可能時間の変化を図-9に示す。図-9(a)についてみると貯留容量の増加に伴い退避可能時間は長くなっている。図-9(b)をみると貯留容量 0mm における退避可能時間が118分以上のイベント3, 7, Aは、貯留容量の増加に伴って退避可能

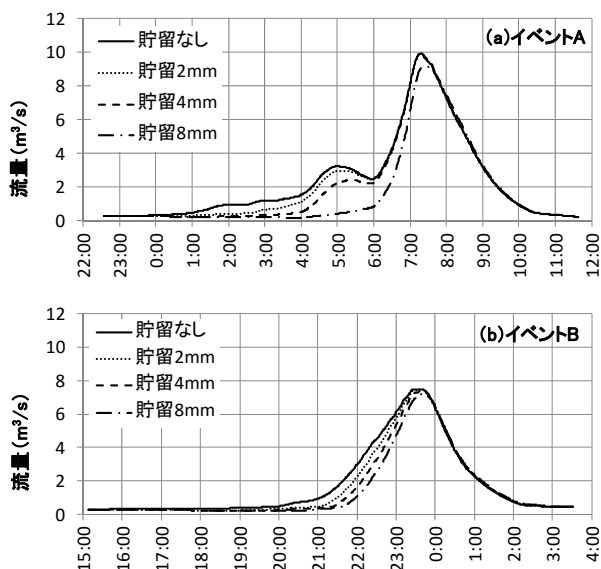


図-8 貯留容量によるハイドログラフの変化

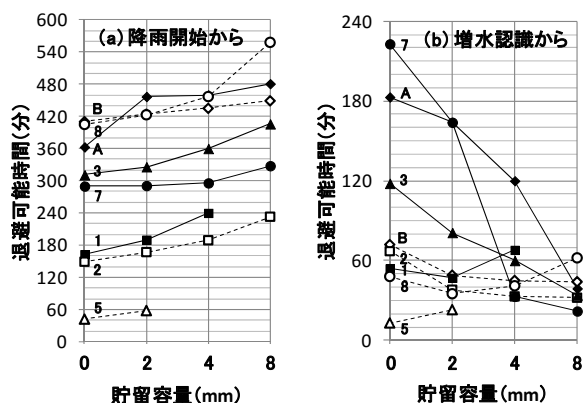


図-9 貯留容量による退避可能時間の変化

時間は大幅に短くなる。貯留容量0mmの退避可能時間が48～72分のイベント1, 2, 8, Bは、貯留容量の増加に伴う退避可能時間の変化は小さい。また、貯留容量0mmの退避可能時間が13分と短いイベント5は、貯留容量2mmで退避可能時間が23分になり、貯留容量4mmでは安全に退避行動できる範囲の増水となる。

初期の降雨に対する貯留量が大きくなると、降雨開始からの退避可能時間が長くなる一方で河川増水に気付いてからの退避可能時間が短くなる傾向があるので降雨情報がより重要となる。また、降雨継続時間が30分程度の強雨イベントに対しては、貯留施設整備によって退避可能時間を大きくし親水活動の安全性を向上させることが期待できる。

6. むすび

合流式下水道が普及している都市中小河川善福寺川を対象に都市貯留関数モデルを用いて降雨流出解析を行い、親水利用時を想定した増水初期における退避行動の可能時間について検討した。

一定の降雨強度の雨を継続させた時の河川流量の計算結果から、降雨開始から安全に退避行動ができる時間は20分間であること、また、河川増水に気付いてから安全に退避行動ができる時間は5分間であることを考慮して対象地点の親水利用を行うことが望まれる。

今後、施設整備により初期降雨の貯留量が大きくなると、増水に気付いてから安全に退避できる時間は短くなる傾向がある。このため、短時間に更新される降雨情報の利用や迅速な退避行動がより重要になる。

参考文献

- 1) 河川審議会都市内河川小委員会：河川を活かした都市の再構築の基本的方向 中間報告，1998。
- 2) 高橋達也，吉川勝秀，山本有二：水辺からの都市再生に関する研究報告，リバーフロント研究所報告，第16号，pp.198-205，2005。
- 3) 東京都建設局河川部：東京の河川事業，2015。
- 4) 杉並区：善福寺川「水鳥の棲む水辺」創出事業行動指針，2014。
- 5) 飯塚秀次，関沢元治：レーダ雨量計のとらえた豪雨災害，平成21年度河川情報シンポジウム講演集，2009。
- 6) 戸田圭一，井上和也，徳永智宏，川池健司：豪雨時の河川親水域の危険度解析，水工学論文集，第46巻，2002。
- 7) 安藤晴夫，和波一夫，石井真理奈，竹内健：雨天時水質調査結果について（1）－雨天時における河川水質の変化－，東京都環境科学研究所年報，pp.121-125，2010。
- 8) 東京都下水道局：東京都下水道局事業概要 平成27年版，2015。
- 9) 東京都：平成27年度東京都水防計画，2015。
- 10) 東京都：荒川水系神田川流域河川整備計画，2010。
- 11) 高崎忠勝，河村明，天口英雄：都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案，土木学会論文集B，Vol.65，No.3，pp.217-230，2009。
- 12) 藤原洋一，田中丸治哉，畑武志，多田明夫：流出モデル定数の最適同定における誤差評価関数の選択に関する研究，農業土木学会論文集，No.225，pp.137-149，2003。
- 13) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. : Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, Water Resources Research, 28-4: pp.1015-1031,

- 1992.
- 14) 須賀堯三, 上阪恒雄, 白井勝二, 高木茂知, 浜口憲一郎, 陳志軒: 避難時の水中歩行に関する実験, 水工学論文集, Vol.38, pp.829-832, 1994.
- 15) 国土交通省北陸地方整備局: 急流河川における浸水想定区域検討の手引き, 2003.
- 16) 社団法人日本機械工業連合会: 平成20年度機械製品の安全性向上のための子どもの身体特性データベースの構築及び人体損傷状況の可視化シミュレーション技術の調査研究報告書, 2009.
- 17) 角道弘文, 西山美加: 河川での子どもの親水活動における流れ場の選好性分析, 農業農村工学会論文集, No.259, pp.1~pp.6, 2009.
- 18) 伊藤嘉奈子, 天野邦彦, 富田陽子, 原野崇, 岸田弘之, 宮尾博一, 吉野英夫, 並木和弘: 学校での河川学習の効果と河川教育プログラムに関する研究, 河川技術論文集, 第17巻, 2011.
- 19) 船山吉久: 合流改善の効率的なレベルアップのためのリアルタイムコントロールシステムの開発, 東京都下水道技術調査年報, 2000.
- (2016. 4. 7 受付)

RAIN-RUNOFF ANALYSIS OF THE ZENPUKUJI RIVER IN URBAN AREA FOR RIVER RECREATION

Tadakatsu TAKASAKI, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI
and Shigeyuki ISHIHARA

A storage function model estimated flood discharge due to storm rainfall for river recreation in small river. Rain-runoff of small river in urban area is affected by the outflow characteristics of the combined sewer system greatly. The model which for urban flood considers outflow characteristics of the combined sewer system, is applied to the river catchment of the Zenpukuji River in Tokyo, the typical urbanized area, against 10 storm rainfall events. Time of feasible safe evacuation is obtained by the runoff analysis result. Also, the change of runoff characteristics by storage facilities to hold the initial rainwater is investigated.