

ICT を活用した都市河川監視システム

東急建設(株)	正会員	○高倉 望
中央大学大学院	正会員	小山 直紀
中央大学大学院	正会員	町田 果歩
中央大学大学院	正会員	山田 正

1. はじめに

近年、地球規模の気候変動に伴い気温や海水温が増加することで、都市域での局地的大雨（いわゆるゲリラ豪雨）が増加傾向を示している。そのため、都市域での浸水害に対する防災・減災技術の開発は、建設業にとっても、安全管理、品質管理、工程管理を考える上で重要である。そこで、筆者らは、ICT（情報通信技術）を活用した「都市河川監視システム」を開発した。

本システムにより予測した河川水位（河川予測水位と略す）が管理値を超過すると一斉にアラートメールを発報したり、現場内に設置した回転灯を点滅したりして早い段階で工事関係者へ河川増水情報を提供することができる。そこで、本論文では、2017 年度に発生した局地的大雨に対して本システムによる河川予測水位の精度や運用状況を検証した結果とその結果から得られた課題について報告し、その課題に対処して再検証した結果、河川予測水位が観測値を精度良く再現できたので報告する。

2. 都市河川監視システムの概要

都市河川監視システムとは、気象庁から5分毎に発信されている高解像度降水ナウキャストの降雨強度を入力情報として1時間後までの河川水位を予測するクラウドシステムである。ここで、高解像度降水ナウキャストとは、国土交通省（気象庁を含む）・地方自治体が保有する全国の雨量計のデータ、ウィンドプロファイラやラジオゾンデの高層観測データ、気象庁が保有する気象レーダーや国土交通省のXバンドMPレーダーネットワーク(XRAIN)を利用した250 m 格子で降水の短時間予報を提供する防災気象情報（オープンデータ）のひとつである。よって、気象レーダーを活用していることから降雨情報を“点”でなく“面”の情報として取得できる。

図-1に解析の対象となる渋谷川上流域を250 m 格子で細分割した図を示す。渋谷川は、図-1に示すように現場となる渋谷駅より上流側が暗渠で、下流側が開口路である。渋谷川の開口路には、暗渠内に設けられている数か所の越流堰（現場付近の越流堰の位置を図-1の“○”で示す）を越えた雨水のみが流れるため、晴天時は、水の流れがほとんど無い。しかし、一旦豪雨が発生すると急激に増水する。一例として、2015年9月4日のゲリラ豪雨時には、河川水位が10分間以内で3.3 m 増水した記録がある¹⁾。

本システムの構成図を次頁の図-2に示す。高解像度降水ナウキャストの降雨予測情報を基にインターネットを介してクラウド上で洪水解析し、河川予測水位を算出する。算出された河川予測水位は、パソコンやモバイル機器を通して工事関係者間で共有できる。さらに河川予測水位が現場で設定した管理値を超過するとアラートメールの発報や現場に設置した回転灯を点滅させて早い段階で洪水情報を共有できる。

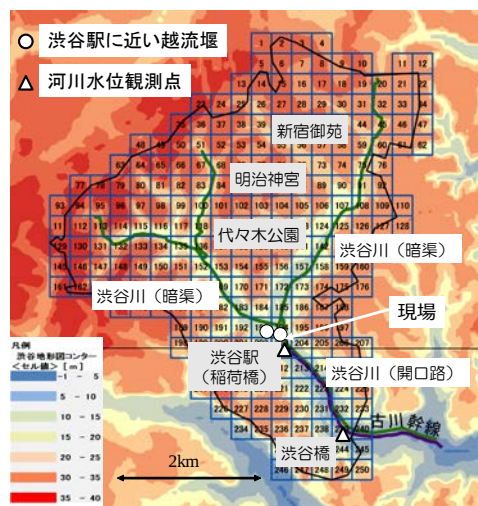


図-1 渋谷川上流域の分割モデル

キーワード ICT, ゲリラ豪雨, 防災/減災, 高解像度降水ナウキャスト, 気象レーダー

連絡先 〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 東急建設(株) 土木事業本部 技術統括部 環境技術部 TEL 03-5466-1853

3. 局地的大雨時のモニタリング精度とその課題

(1) システムに用いた洪水解析手法

図-3 に洪水解析の詳細な流れを示す。本システムで用いている流出解析は、合成合理式である。合成合理式を用いた根拠として、対象とする集水面積が約 10 km² と比較的狭いことがあげられる。

一般的に、合成合理式は、流量を算出するために合理式による計算結果を重ね合わせる手法であり、中小河川の計画において従来から多く用いられている。以下の(1)式に示す解析解は山田らによって物理的に導出されたものであり、詳細な導出については山田らが報告している「合成合理式の理論的導出」²⁾を参照していただくものとし、本論文では割愛する。

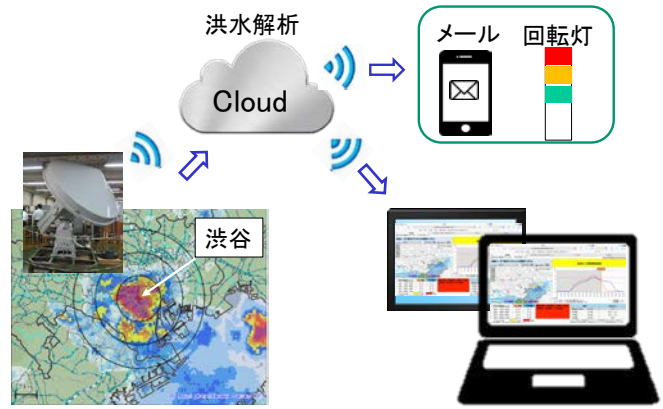


図-2 都市河川監視システム構成図

$$q_n(t) = r_n^{ave} v \left[\left\{ (t - t_n) H[t - t_n] - (t - (t_n + t_r)) H[t - (t_n + t_r)] \right\} - \left\{ \left(t - t_n - \frac{x}{v} \right) H \left[t - t_n - \frac{x}{v} \right] - \left(t - (t_n + t_r) - \frac{x}{v} \right) H \left[t - (t_n + t_r) - \frac{x}{v} \right] \right\} \right] \quad (1)$$

ただし、 H ：ヘヴィサイドのステップ関数は以下の(2)式のように表すことができる。

$$H(x - a) = \begin{cases} 1 & (x > a) \\ 0 & (x < a) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 x ：斜面長、 t_n ：降雨開始時間、 t_r ：降雨継続時間、 v ：断面平均流速、 r ：降雨強度である。

洪水解析に用いる降雨強度は、気象庁が気象情報を取得した時刻から3時間前の実況解析値と1時間後の予測値である。合成合理式で算出した河川流量は、河川の断面形状と状況から求まるH-Q曲線（河川の水位と流量の関係）を基に流量から河川水位に換算する。H-Q曲線を決定する際に必要なパラメータは、河川断面の形状から求まる通水断面積、潤辺（流れの横断面で水に接している長さ）と粗度係数（河川の水が河床や河岸などと触れる際の抵抗量）、河床勾配である。ここで、通水断面積と潤辺は河川標準断面から求めた。粗度係数はコンクリートの水路程度（0.015 m^{-1/3}s）、河床勾配は、1/420³⁾とした。

(2) 洪水解析

解析に用いた降雨事例は、2017年5月18日に発生したゲリラ豪雨である。当日は、渋谷川の渇水期間内であり、河川内に重機を据え付けて作業を行っていた。図-4に当日の降雨状況と河川水位変化を示す。当日の降雨強度の最大値は、東京都が観測している渋谷橋（現場から1.3 km下流側）で36 mm/hであった。現場（稲荷橋）の河川ピーク水位は、2.67 m（15:10頃）であった。

図-5に解析モデルと入力値を示す。解析モデルは、流域を流れる渋谷川（現在は、暗渠）の支流毎に4分割した小流域と代々木公園の合計5分割とした。洪水到達時間*は、過去の観測結果を基に渋谷駅から比較的離れたAとCの小流域が30分、現場に近いBの小流域が20分とした。なお、パラメータは、管理上、安全側に設定している。

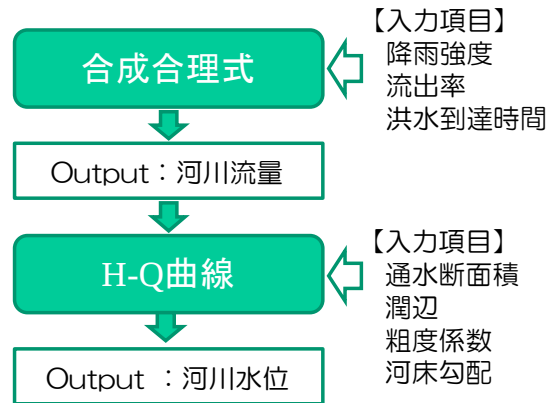


図-3 洪水解析の流れ

※洪水到達時間とは、雨水が排水区域内の最遠隔の地点から地表面を流れて排水路に流入するまでの時間（流入時間）と流入した雨水が排水路を流れてある地点まで到達するのに要する時間（流出時間）の合計。

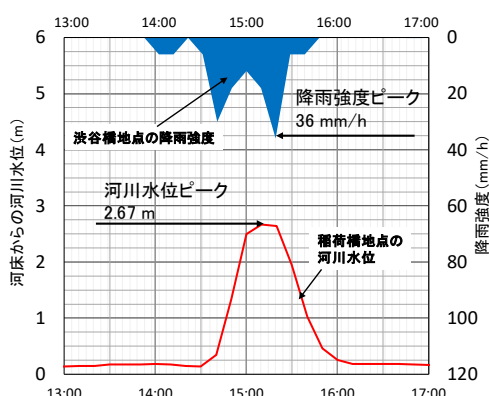


図-4 2017年5月18日の降雨強度と河川水位

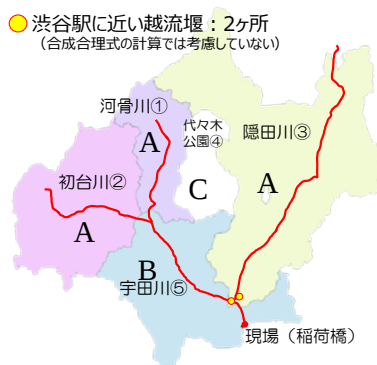


図-5 解析に用いた流域モデルと入力情報

洪水到達時間（分） 2種類

	A	B	C
洪水到達時間	30	20	30

流域の概要

流域番号	流域面積[km ²]	流出率
①	0.9	0.8
②	2.2	0.8
③	4.1	0.8
④	0.6	0.2
⑤	2.1	0.8

(3) 洪水予測解析結果

図-6に解析結果を示す。図の上段は、高解像度降水ナウキャストの実況解析値を示す。下段は、河川水位変化の解析値と観測値を比較して示す。

図-6から、河川水位の立ち上がり時刻が観測値より解析値が50分早い。また河川ピーク水位が2.1m高い。この要因のひとつとして現場の上流側に築造している越流堰（越流高1.6m程度）の効果が考えられる。河川ピーク時刻は、解析値が観測値より10分遅いが概ね再現されているものと判断している。

図-7に2017年度に渋谷川上流側に発生した主な豪雨に対して、河川ピークの水位差と時間差を示す。図-7から河川ピーク水位差は、解析値が観測値より0.2m～2.4m大きく得られた。河川ピークの時間差は、5月18日以外は概ね15分以内に収まった。なお、図-7の“○”で囲んだ台風時の河川ピーク水位差が小さい。この要因として、ゲリラ豪雨のような局地的大雨に比べ、台風の場合は、降雨時間が長いいため、本システムでは、考慮できていない現場上流側の越流堰の影響が計算結果に反映されていないと判断している。

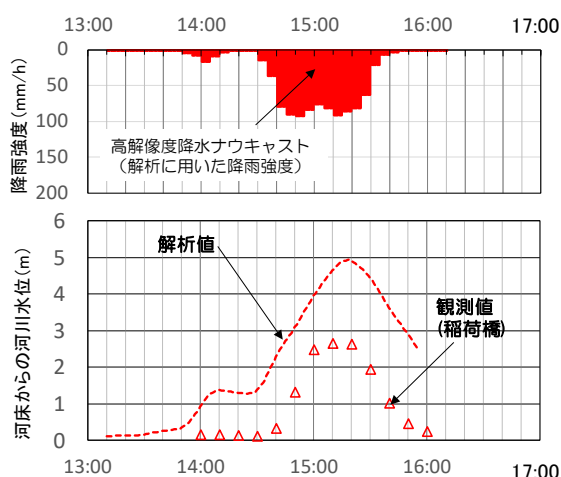


図-6 2017年5月18日の洪水解析結果

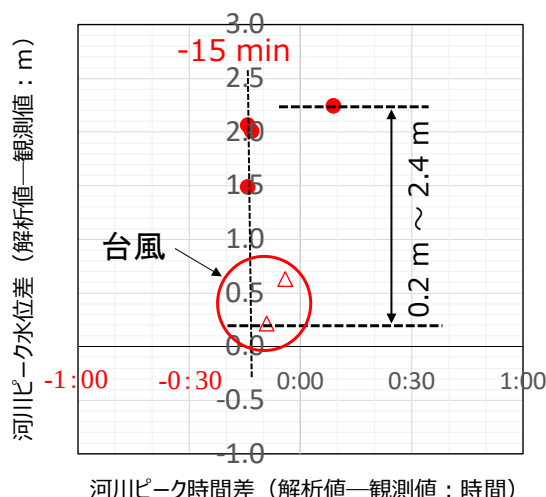


図-7 2017年5月18日の洪水解析結果

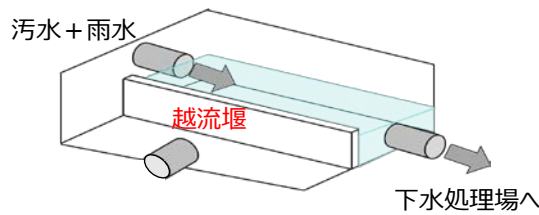
(4) 残された課題

図-7から本システムに用いた洪水解析モデルとパラメータでは、河川予測水位が観測値より高めに得られることが分かった。傾向としては安全側であるが、精度としては課題が残る。そこで、河川予測水位の立ち上がり時刻が観測値よりも約50分早めに計算されていること、さらに長雨の場合に、観測値と比較的精度が高いことから暗渠内に設けられている越流堰の効果を加味することで精度が向上すると判断した。そこで、次章に越流堰をモデル化した洪水解析を実施し、加えて観測値を再現できるパラメータを算出した。

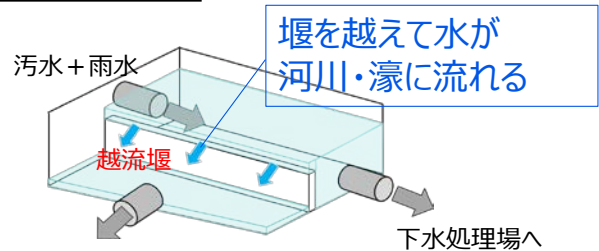
4. 課題への対処

合成合理式による地表面計算のみの結果では、河川水位曲線の概形は概ね再現できているものの、観測している河川水位と比較すると立ち上がりが早い。また、河川ピーク水位が大きいことなど再現できていない部分がある。この原因として、3章(4)で述べたように、合成合理式のみの計算では暗渠内の越流堰の影響が考慮できていないことが考えられる。対象とする集水域では、合流式下水道が使用されている地域であり、晴天時は、汚水は下水処理場に流れる。しかし、降雨時において、合流式下水道では汚水と雨水が合わり流れるため、下水処理場の処理能力を超える下水は越流堰を超えて渋谷川へ流出する。そのイメージ図を図-8に示す。集水域内の主な幹線上において多数の堰が存在し、それらが流出に大きな影響をもたらすため、越流堰の影響を考慮した計算する必要がある。

越流堰を超過していない状態



越流堰超過時



河川(渋谷川)へ

図-8 越流堰のイメージ

(降雨時において下水処理場で処理しきれない下水は堰を越えて川へ流入する)

そこで、既存のシステムに用いられている合成合理式を用いた地表面計算に加え、管路流計算することで越流堰の影響を考慮した。

都市域において地表面に降った雨は、コンクリート等で舗装された斜面を流下し、マンホールや側溝から下水道に流入する。雨水が越流堰を超えない場合は下水処理場へ流れる。一方、越流堰を越えた場合は、渋谷川に流出する。そこで、管路流計算ではkinematic wave法を用いて一次元不定流の計算を行った。越流堰地点においては、一般に堰の計算に用いられている(3)式、(4)式に示す長方形堰の越流量公式⁴⁾を用いた。

$$Q_s = CB\eta^{3/2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C &= 1.642(\eta/L)^{3/2} \quad (0 < \eta/L \leq 0.1) \\ &= 1.552 + 0.083(\eta/L)^{3/2} \quad (0.1 < \eta/L \leq 0.4) \\ &= 1.444 + 0.352(\eta/L)^{3/2} \quad (0.4 < \eta/L \leq 1.5 \sim 1.9) \\ &= 1.785 + 0.237(\eta/L)^{3/2} \quad (1.5 \sim 1.9 < \eta/L) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 Q_s : 越流量(m^3/s)、 L : 堰長(m)、 B : 堰の幅(m)、 W : 堰高(m)、 η : 越流水深(m)、 C : 流量係数である。図-9に対象集水域にゲリラ豪雨が降った2017年5月18日における稲荷橋地点の実測水位に合成合理式のみの計算結果と、合成合理式と管路流計算を一体化させた計算の計算結果を示す。計算に用いたパラメータは、同定解析を行い、最も観測した河川水位を模擬流出率として0.53、洪水到達時間を50分とした。この図から、合成合理式と管路流計算を一体化させた計算結果は、実測水位と比較して水位の立ち上がりや河川ピーク水位の高さや時間をよく表すことができていることが確認できた。この結果は、他の降雨イベントでも同様であった。このことから合成合理式による地表面計算に加えて、堰を含めた管路流計算をすることによって、より

実際の現象を表現することができた。ここで、同定解析の過程で2017年度の計算に用いた流出率を0.8から0.53に下げたり、洪水到達時間を30分から50分に長くしたりすることで解析値が観測値を再現することができた。流出率に対しては、地盤の湿潤状態や解析モデルで考慮できていない貯水施設、さらに高解像度降水ナウキャストと実雨量の差の影響を加味すると妥当な範囲と判断している。また、洪水到達時間に対しても過去のモニタリング結果から妥当な範囲と判断している。

5. 重機逸失トラブルの回避事例

2017年5月18日のゲリラ豪雨時、12:42に本システムから1次管理値のアラートメールが発報された。現場は、その時刻に河川内で重機作業中（写真-1 a 参照）であったため、現場担当者は、現場の状況を確認し、13:10頃に河川内から重機を引き揚げ、13:40頃に現場担当者が作業員へ最終の注意喚起をした。その40分後の14:20頃から河川水位が上昇し始め、さらに40分後の15:00に河川水位が約2.7 mまで達した（写真-1 b 参照）。今回のトラブル回避事例は、当日の天気が不安定であったため比較的早い段階でアラートメールが発報され、河川水位が立ち上がる約2時間前に現場へ情報を提供でき、重機の引き揚げと作業員の早期避難ができた。

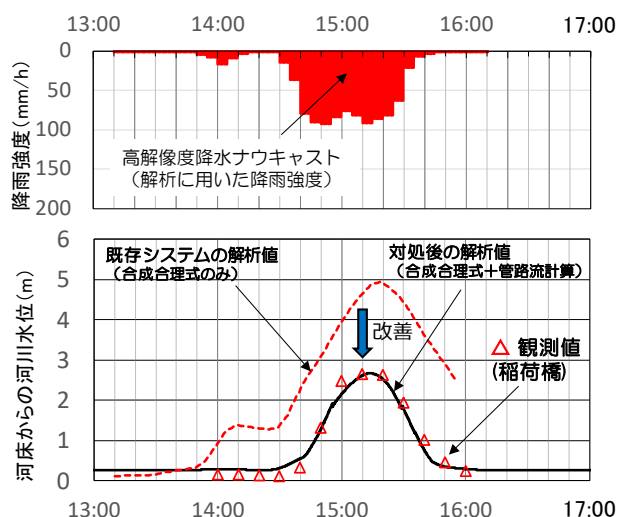


図-9 管路流計算を考慮した計算結果との比較



a 河川内での重機作業状況 (13:10)



b 渋谷川の洪水状況 (15:00)

写真1 現場での重機作業と河川増水の状況

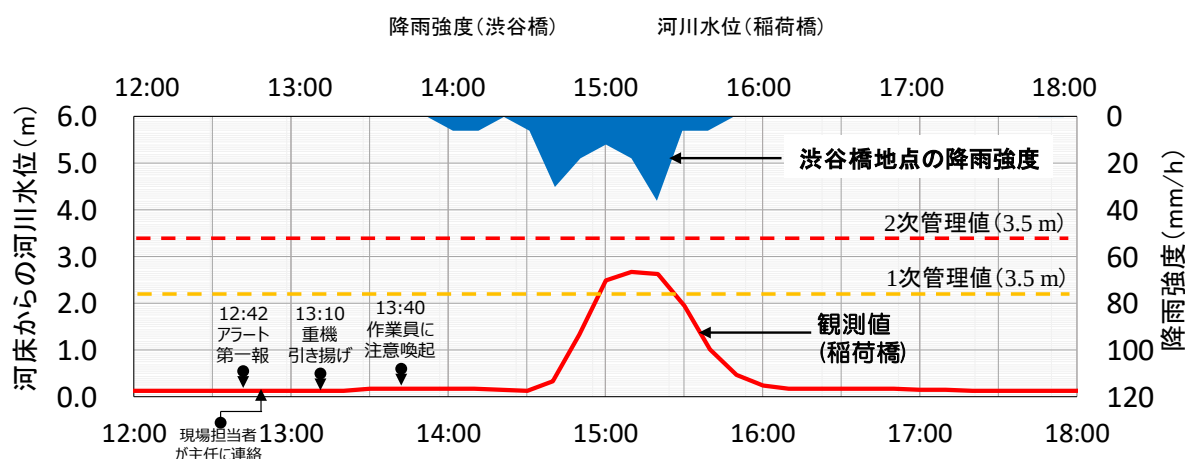


図-10 トラブル回避の対応履歴

6. 今後の展開

2017 年度に ICT を活用した都市河川監視システムを開発し、現場で 1 年間の検証実験を実施した。その結果、当該現場では、気象庁から発信される降雨予測情報（オープンデータ）を基に 1 時間後までの河川水位を高精度で予測できることが実証された。加えて、本システムによりゲリラ豪雨前に作業員と重機の早期退避に貢献できた実績を上げることができた。

今後は、更にデータを蓄積して降雨強度や降雨時間の違いによるパラメータの検証や渋谷川以外の都市河川を対象としたシステムの汎用性に対して検証する予定である。

7. おわりに

豪雨被害は、人命や財産に多大な損害を及ぼすだけでなく、生活に必要となる社会インフラに影響することで国民生活と社会経済活動にも大きなダメージを与える。特に都市域での被害は、我が国の経済的損失に及ぼすことになり兼ねない。

建設業においても、現場の安全、品質、工程などに多大な影響を与える。そこで、ICT を活用することでゲリラ豪雨による都市河川への影響を早い段階で予測し避難指示を出すことは、作業員や重機および資機材などの退避に余裕が生じ、工事中の減災に寄与できる。また、気象庁が発信する気象予測情報は、河川監視システム以外でも豪雨前の斜面の法面養生やコンクリートの打設時の養生など、早い段階で対応することで品質に関わる被害を最小限に抑えることができる。

今後も、東急建設では、本システムのノウハウを活用し、気象予測情報と ICT を連携させた防災／減災技術の開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 高倉望，池田直広：ゲリラ豪雨に伴う都市河川の水位変化予測解析，東急建設技術研究所報，No. 42，pp. 75-80, 2016.
- 2) 渡邊暁人，笹田拓也，渡辺直樹，山田正：合成合理式の理論的導出，水工学論文集，Vol. 56，pp. 499-，504，2012
- 3) 東京都建設局 HP：渋谷川・古川の流域
<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/river/kankyo/ryuiki/08/sh2/sh2-1.html>
- 4) 土木学会 水理公式集[平成11年度版]