

都市沿岸部を対象とした 浸水ナウキャストシミュレーション

佐貫 宏¹・渋尾 欣弘²・李 星愛³・吉村 耕平⁴・田島 芳満⁵
・古米 弘明⁶・佐藤 憲司⁷

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:hiroshi.sanuki@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail:shibuo@icharm.org

³非会員 東京大学大学院特任研究員 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:sungae@env.t.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 高知工科大学助教 経済・マネジメント学群 (〒780-8515 高知県高知市永国寺町2-22)

E-mail:yoshimura.kouhei@kochi-tech.ac.jp

⁵正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:yoshitaji@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

⁶正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:furumai@env.t.u-tokyo.ac.jp

⁷フェロー会員 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:sato@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

都市沿岸部の浸水・氾濫予測には、河川、下水道、海岸からの影響を考慮することが重要である。著者らは、こうした沿岸低平地の浸水予測を目的として、統合浸水予測モデル（シームレスモデル）を構築してきた。本研究では、本モデルを活用して、高解像度降水ナウキャストを用いたリアルタイム浸水予報について検討した。過去の台風イベントを対象として検討したところ、高解像度降水ナウキャストを活用することで、直近の浸水に対して精度良く予測し得ることが解析結果より示された。また、水位センサーを使って下水道管渠内の水位情報についても収集し、モデル検証を実施した。

Key Words : inundation forecast simulation, integrated flood prediction model, urbanized coastal area, Tsurumi river basin, high-resolution precipitation nowcast data

1. 研究の目的

近年、洪水のほか、内水、高潮等によって想定を超える浸水被害が多発しているように見える。特に、内水については、局地的な集中豪雨（いわゆるゲリラ豪雨）により頻繁に浸水被害が起きている。また、海外では巨大台風による高波や高潮によって多数の死者がでているケースもある。

一方、2015年に水防法が改正され、河川洪水に関しては想定しうる最大規模の降雨を前提とした浸水想定区域に拡充されたほか、内水および高潮に関する浸水想定区域制度も新たに創設された。これまで洪水や内水、高潮はそれぞれ独立した事象として解析されることが多かったが、人口や産業が集中する都市沿岸部での浸水想定において、高潮時に相当量の河川流量が想定される場合

には、それらも考慮した外力設定とすることが変更に盛り込まれた。

こうした背景から、著者らは、都市沿岸部を対象として、河川、下水道、海岸といった様々な氾濫因子を考慮した統合浸水予測モデル（シームレスモデル^{1,2)}）を開発してきた。本モデルを代表的な都市河川である鶴見川流域での浸水問題に適用してきたが、モデル検証をする上で、下水道管渠内の流れに関する情報不足を感じていた。また、気象庁 GPV データ（MSM）を利用したリアルタイム浸水予報についても検討してきたが²⁾、予測結果を防災情報として活用する上では、リードタイムが短くても高精度な予測降雨による検討も必要と考えられた。

そこで本研究では、小型水位センサーを用いた下水道管渠内の水位観測と、2014年から運用が開始された高解像度降水ナウキャストを用いた浸水予測シミュレーションについて実施したので、これを報告する。

2. シームレスモデル

シームレスモデルのイメージ図を図-1に示す。シームレスモデルは、①上流端流量を与える分布型流出モデル、②河道解析のための一次元河道モデル、③下水道ネットワークモデル、④地表面流出を表現する氾濫モデル、⑤高潮予測モデル等の沿岸水理モデル、といった複数のサブモデルから構成される。降雨、風、気圧等の気象データを入力値として、それぞれのサブモデルに基づき、河川、下水道、海岸の影響を考慮した都市沿岸部における氾濫の一体的な解析が可能となっている。以下、各サブモデルについて概要を記す。

(1) 水エネルギー収支分布型水循環モデルWEB-DHM

降雨による河川上流での流出量算定には、水エネルギー収支分布型水循環モデルWEB-DHM³⁾を用いている。WEB-DHMは、陸面過程モデルSiB2⁴⁾と、分布型流出モデルGBHM⁵⁾を融合したモデルである。本モデルは、植生による蒸発散や土壤浸透を考慮しながら、降雨による地表面流出が解析可能である。これに加えて、鶴見川流域には多くの防災調整池が点在しており、本モデルではこれらの洪水低減効果も考慮されている⁶⁾。

(2) 一次元河道モデル

落合橋地点から鶴見川河口までの感潮区間は、一次元河道モデルに基づき解析を行う。解析では先述のWEB-DHMによる計算流量を上流端で与え、一方の下流端では高潮モデルによる計算潮位を与える。また、連続式右辺のソース項により、背後地への越流、支川あるいは下水道からの流入を考慮する。なお、底面摩擦については、観測水位と合うように、区間毎にマニング粗度係数を $n=0.025 \sim 0.04$ の間でチューニングしている。

(3) 下水道ネットワークモデル

下水道管渠については、St.Venant方程式に基づく管路ネットワークモデル⁷⁾に基づき、それぞれLINK（管路部分）およびNODE（マンホール部分）において以下の基礎方程式に従う。

[LINK]

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 Q |Q|}{R^{4/3} A} \quad (2)$$

[NODE]

$$\frac{\partial H_m}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_m + \sum A_s} \quad (3)$$

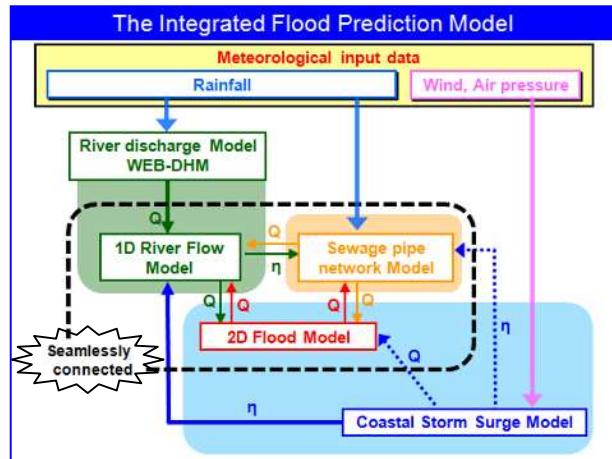


図-1 シームレスモデルの概要図

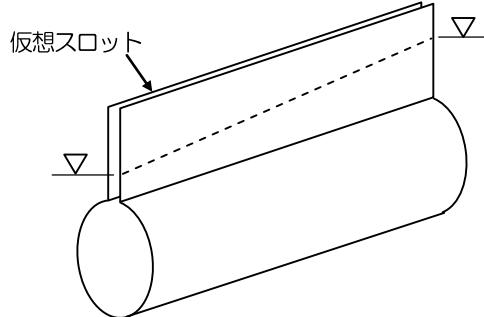


図-2 Preissmanスロットモデル

ここに、 x : 流下方向座標、 t : 時間、 g : 重力加速度、 A : 通水面積、 Q : 流量、 q : 横流入、 H : 水位、 R : 径深、 n : 粗度係数、 H_m : マンホール水位、 A_m : マンホール断面積、 ΣQ : マンホールでの水の出入り量、 ΣA_s : 管渠内の自由水面の面積である。管路ネットワークモデルでは、合流、分水、溢水、ポンプ等による水量変化はマンホールのみにおいて生じ、両端のマンホール水位の変化によって、管渠内の流れが支配される。また、自由水面をもつ開水路と圧力管路を同時解析するため、管渠天端に幅の狭い仮想的な水路を設けるPreissmanスロットモデル（図-2）を採用している。

(4) 地表面流出モデル

雨水による地表面流出モデルでは、一般的に、非線形貯留池モデル等のキネマティックモデルを用いる場合が多い。しかし、本モデルでは、内水や外水氾濫を解析するための二次元不定流モデルを組み込んでおり、雨水流についても連続式にソース項を付加する形でこれを表現する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r_e \pm q_{sew} \quad (4)$$

ここに、 M および N : 水平方向の線流量、 η : 水位、 r_e : 有効降雨、 q_{sew} : マンホールからの溢水・流入である。

(5) 高潮予測モデル

高潮予測モデルは、気圧低下による吸上げ効果ならびに風による吹き寄せ効果を考慮した非線形長波式⁸⁾に基づく。本研究の対象エリアでは波によるセットアップはして加味していないが、必要に応じてこれを考慮することも可能である。

3. 下水道管渠内の水位観測

(1) 対象エリア

本研究で対象とするエリアは代表的な都市河川である鶴見川流域（図-3）である。鶴見川は東京都町田市を源流として、東京湾へ注ぐ流路長43 kmの一級河川である。下流部の低平地を蛇行して流れるため、もともと氾濫しやすい形状であったが、1960年代から急速に都市化が進んだことで浸水被害が深刻化した。そのため、現在では特定都市河川浸水被害対策法の指定河川として、流域一体となって総合治水対策が進められている。

代表的な対策の一つが鶴見川中流部に設けられた、面積84ha、総貯留量390万m³の多目的遊水地である（図-3 黄色エリア）。

普段は公園として利用されているが、ある程度の規模の洪水が発生すると、河川から遊水地へ水が越流し、河道内の水位を低減する機能がある。

もう一つは地下65 mほどの深さに設置された大規模雨水貯留管である。中でも新羽末広幹線（図-3赤線）は延長約20 km、最大径8.5 m、貯留量41万m³と最大である。そのほか河川および海岸沿いには17か所のポンプ排水施設がある。

(2) 水位センサーの設置個所と設置方法

前述の新羽末広幹線へは幾つかの雨水幹線から越流堰を介して流れ込む仕組みとなっている（図-4）。ここでは3か所（図-3の①②③）の雨水幹線に水位センサーを設置し、降雨に対する下水道管渠内の水位応答を調査した。データ収録には水圧式の小型水位センサー（HOBO 製 U20L）を使用し、3か月に一度程度の頻度でセンサーを交換しながら、平成28年2月から12月にかけて計測を実施した。

(3) 水位観測結果

図-5に、調査期間の降雨量および水位（管底を0）の時系列グラフを示す。観測開始当初、目立った水位上昇は確認できなかったものの、夏場の7～9月にかけて4回程比較的大きなイベントを観測した。図中には点線で越流堰の高さを示しているが、①江ヶ崎地点では3回程堰の高さを超えて水位が上昇しており、これは新羽末広幹線への雨水流入が生じたことを示している。

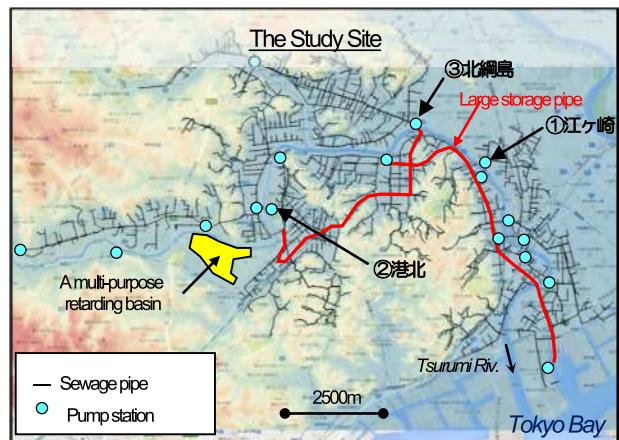


図-3 対象エリアとセンサー設置個所



図-4 水位センサーの設置状況

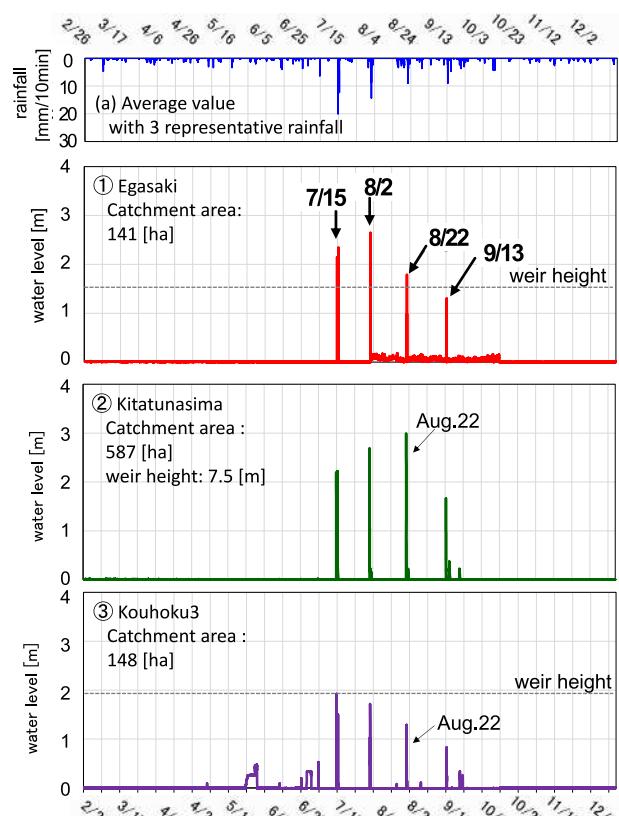


図-5 水位観測結果

(4) シームレスモデルによる再現計算

このうち8月22日のイベントについてシームレスモデルに基づく再現計算を実施し、観測値との比較を行った。再現計算結果として下水管渠内の水位を図-6に示す。表-1には主な解析条件を示すが、特に入力降雨としてはXRAIN観測降雨を用いている。観測値と比べて立ち上がりの時間帯やピーク値等に違いがみられるものの、降雨に対応した水位上昇は概ね評価できており、下水管渠内の水位応答に関して一定のモデル精度は確認できたといえる。

4. 高解像度降水ナウキャストを用いた浸水予報

(1) 検討概要

ここではリアルタイム浸水予報としてのモデル適用性を検討するにあたり、高解像度降水ナウキャストおよび降水短時間予報を入力降雨とした浸水予報を実施した。

(2) 入力降雨の設定方法

表-2は各降雨情報に関する仕様を整理したものである。本検討では、降雨観測値として高精度なXRAINを使用するとともに、予測降雨としてはGPV (MSM) データと比べて予測時間は短いが時空間分解能が高く、高精度と思われる高解像度降水ナウキャストおよび降水短時間予測の2種類のデータを使用した。

シームレスモデルへの降雨入力は、図-7に示すように、浸水予測開始時刻（図中の現在時刻）までは、XRAINの降雨情報を真値としてシームレスモデルに与え（図中左の青色ハイエトグラフ部分）、予測開始時刻以降はXRAINからそれぞれの予測降雨に入力を切り替える形でシミュレーションを実施した（図中橙色・緑色ハイエトグラフ部分）。各予測降雨の予測時間はそれぞれ1時間と6時間であり、この浸水予測手法によってそれぞれ1時間と6時間の予測リード時間が得られる事になる。

(3) 対象イベント概要

2014年10月の台風18号では大きな高潮は発生しなかつたものの、東日本の太平洋側を中心に激しい降雨をもたらした。鶴見川流域の都田地点では総雨量が360 mmに達し（図-8）、10月6日10時頃には50 mm/hを超える猛烈な雨が流域の広範囲で観測された。

また、この台風によって多目的遊水地では過去最大となる154万 m³の河川水が流入し⁹⁾、また新羽末広幹線では38万 m³の貯留量を記録した¹⁰⁾。なお、これらの貯留実績に対してシームレスモデルによる解析では、それぞれ179万 m³、39万 m³と概ね妥当な結果が得られている²⁾。

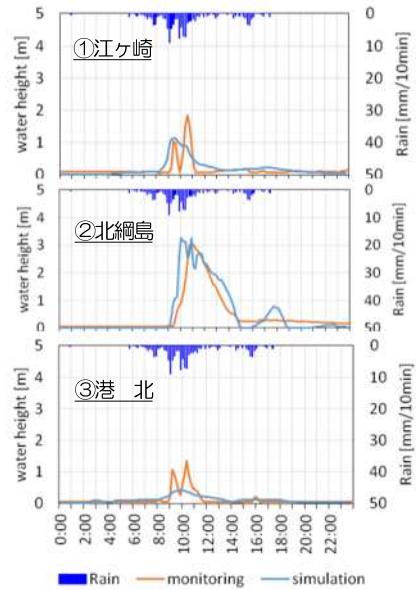


図-6 下水管渠内水位の再現計算結果

表-1 主な解析条件

計算領域	10km×17km
計算格子	$dx=dy=40m$, 425×250メッシュ
計算地形	基盤地図情報5mメッシュより作成
河 川	上流端：落合橋地点流量 下流端：鶴見川河口潮位 支川流量：鳥山川、早瀬川、矢上川
下水道	φ600以上の管渠データを対象 管 渠： 8786本 マンホール： 8820個 スロット幅： $B=0.1D$ (D は管径)
ポンプ場	17箇所（ポンプ排水量は水頭流量表より算定）
貯留施設	多目的遊水地、新羽末広幹線
マニング 粗度係数	河 道： $n=0.025 \sim 0.040$ (m ^{-1/2} s) 地表面：土地利用に応じて設定 管 渠： $n=0.013$ (m ^{-1/2} s)
降 雨	XRAIN観測降雨
降雨損失	ホートン式 ($f_0=20\text{mm/h}$, $f_c=8\text{mm/h}$, $k=0.001\text{s}^{-1}$)

表-2 各降雨情報に関する仕様

データ名	更新頻度	空間分解能	時間分解能	予測時間
XRAIN	1分	250m	—	—
高解像度降水 ナウキャスト	5分	250m (1km)	10分	1時間
降水短時間予報	30分	1km	1時間	6時間
MSM-GPV	3時間	約5km	3時間	15時間

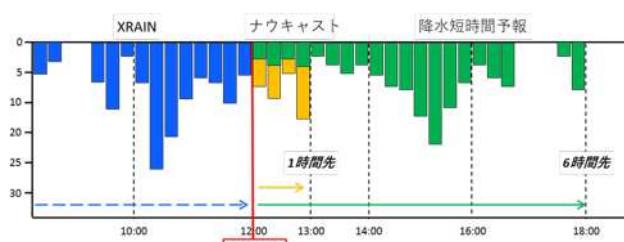


図-7 浸水ナウキャストのリードタイム概略図

(4) 浸水予測解析結果

図-9左は降雨外力にXRAINを与えた2014年台風18号の都市浸水予測の再現結果である。図中のネットワークは下水道網を示しており、貯留管が満管に近づくに従って緑から赤色で示される。また図中丸印で示された箇所は下水道網からの溢水箇所を示している。

図-9左では10時から11時にかけて降雨が強まるにつれて、雨水幹線では黄色や赤色で示されるように貯留量が増えているのが確認できる。また、複数箇所で地表面への溢水が発生している。本再現計算では比較的多数の箇所において溢水が生じているが、横浜市記者発表資料では鶴見川都市流域における浸水箇所は7箇所とされており、やや過大評価となっているものと推測される。

図-9中は高解像度降水ナウキャスト予測を外力とした解析結果である。ここでは10月6日10時に提供された結果の20分、40分、60分先の結果を示している。10:20の予測開始当初において一部内水氾濫が生じている箇所があるが、予測リードタイムが進むにつれて内水氾濫の範囲が縮小傾向となり、11:00の時刻においてXRAINを入力とした結果と比較すると浸水範囲が小さい結果となった。

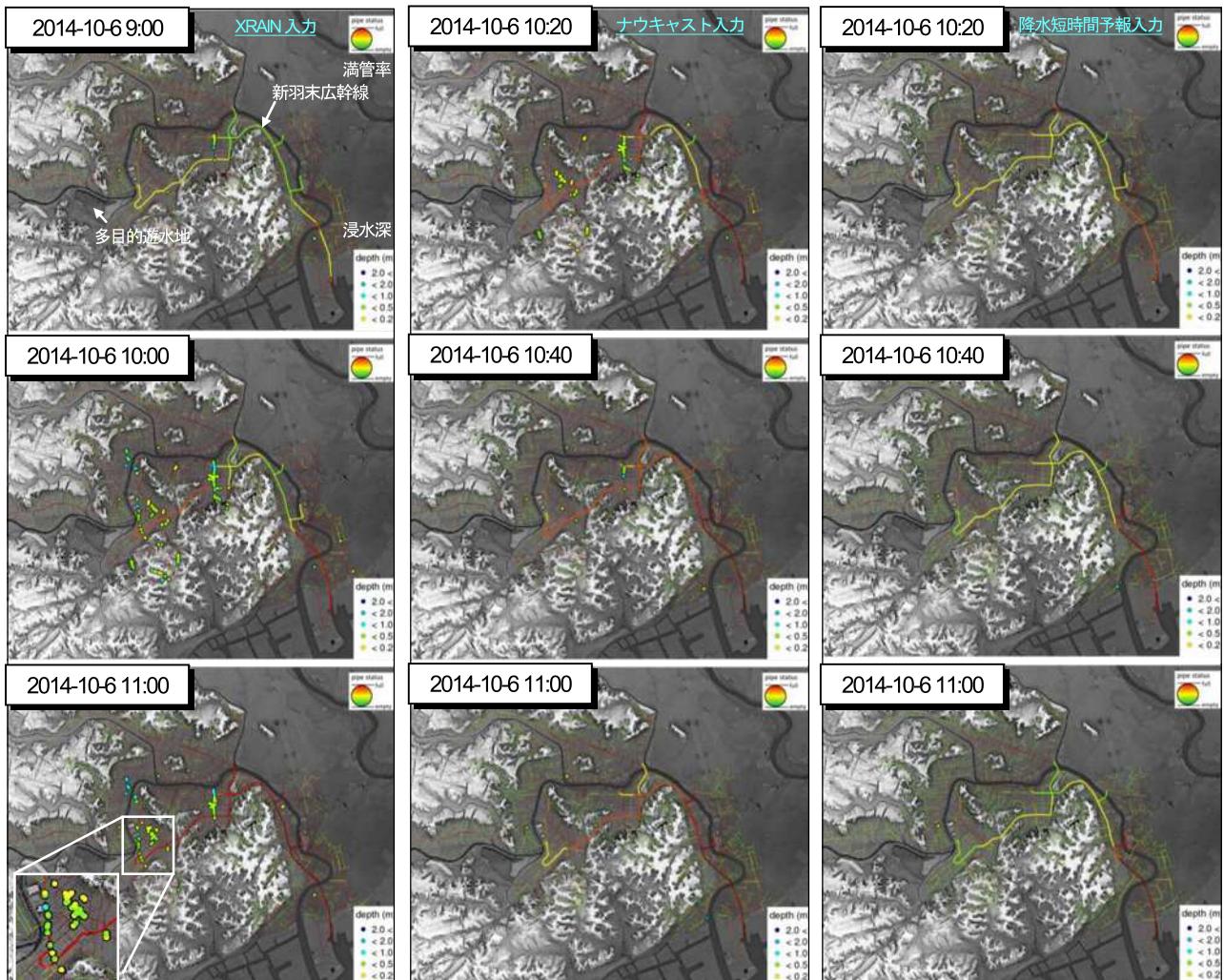


図-9 都市浸水予測結果
(左:XRAIN入力、中:高解像度降水ナウキャスト入力、右:降水短時間予報入力)

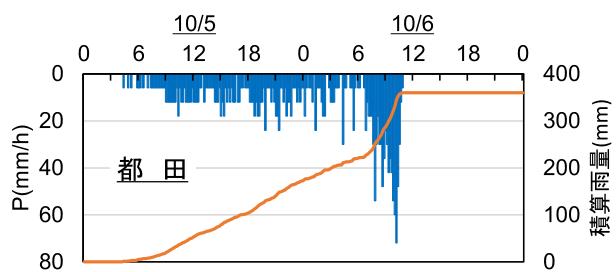


図-8 都田地点における降雨観測値

これは降雨収束期において降雨を実際よりも過小評価していることが要因として考えられる。

一方、図-9右は降水短時間予報を外力とした解析結果である。ここでは10月6日6時に提供された予測降雨に基づく10:20, 10:40, 11:00における浸水予測結果を示している。高解像度降水ナウキャストによる予測結果と比較すると、下水道網と地下貯留管における貯留率がさらに低くなっている事がわかる。さらに、内水氾濫を示す箇所についても限られた数箇所に止まっており、XRAINや高解像度ナウキャストと比べ、1時間累加雨量では強い降雨を表現することが難しいためと推測される。

5.まとめ

本研究では主に以下の成果が得られた。

- (1) 現地調査を実施して、従来情報が不足していた下水管渠内の水位データを取得し、降雨による下水管渠内の実際の水位応答を捉えた。
- (2) 著者らが構築してきた統合浸水予測モデル（シームレスモデル）を用いて、下水管渠内の水位応答に関する再現計算を試み、一定のモデル精度を確認した。
- (3) 高解像度降水ナウキャストおよび降水短時間予報を活用した都市浸水予報について検討した。
- (4) 前者はリードタイムが1時間と短く、降雨収束時の降雨についてやや過小評価する傾向があるものの、直近の浸水について予測し得る事が示された。
- (5) 後者については予測精度は劣るもの、6時間先までの浸水傾向を予測し得ることから、両者を効果的に組み合わせることで、長いリードタイムで高精度な浸水予測が期待できる。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発ならびに下水道技術研究開発の補助を受けた。また、下水道の水位観測では横浜市の協力を得た。ここに深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：沿岸低平地における河川、下水道、海岸のシームレスモデルに基づく実

時間氾濫予測システムの構築、平成26年度河川砂防技術研究開発報告書、2015。

- 2) 佐貫宏、渋尾欣弘、李星愛、吉村耕平、田島芳満、古米弘明、佐藤慎司：様々な氾濫因子を考慮した都市沿岸部の氾濫予測解析、土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 72, No.2, pp.I_517-I_522, 2016.
- 3) Wang, L., Koike, T., Yang K., Jackson, T.K., Bindlish, R. and Yang, D.: Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99) , J. Geophys. Res. Atmos, Vol. 114, D08107, 2009.
- 4) Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L.: A revised land surface parameterization (sib2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation, Journal of Climate, Vol. 9, pp. 676-705, 1996.
- 5) Yang, D., Koike, T., and Tanizawa, H.: Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper tone river of Japan, Hydrological Processes, Vol. 18, pp.3119-3132, 2004.
- 6) 吉村耕平、田島芳満、佐貫宏、渋尾欣弘、佐藤慎司、小池俊雄：低平地都市河川におけるリアルタイム洪水シミュレーションモデルの開発、土木学会論文集B1(水工学), Vol. 70, No.4, pp.I_403-I_408, 2014.
- 7) 川池健司、中川一、今井洋兵、山田裕三：都市域の内・外水氾濫解析における下水道システムのモデル化、京都大学防災研究所年報、第51号B, pp.591-601, 2008.6.
- 8) 宮崎正衛：高潮の研究、成山堂書店、134p., 2003.
- 9) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：多摩川、鶴見川、相模川の台風18号による出水概要について、記者発表資料、2014.10.
- 10) 横浜市環境創造局下水道事業調整課：横浜市記者発表資料、2014.10.

(2017.3.15受付)

INUNDATION FORCAST SIMULATION IN URBANIZED COASTAL LOW-LYING AREAS BASED ON HIGH-RESOLUTION PRECIPITATION NOWCAST DATA

Hiroshi SANUKI, Yoshihiro SHIBUO, SungAe LEE, Kouhei YOSHIMURA,
Yoshimitsu TAJIMA, Hiroaki FURUMAI and Shinji SATO

Urbanized coastal low-lying area has vulnerability against flood and inundation, which are caused by multiple flood causing factors occurring in coast, river and urbanized areas. Integrated flood prediction model, "Seamless Model", has been developed to simulate inundation caused by tsunami, storm surge, as well as river flood and urban inundation. This study applied the model to realtime inundation forcast simulation based on high-resolution precipitation nowcast data. Simulation test to past typhoon event indicated that this method can accurately predict forth-coming inundation in several tens of minutes. Field observation was also conducted to collect the water level data of sewerage pipes to validate the model.