様々な氾濫因子を考慮した都市沿岸部の 氾濫予測解析

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 慎司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。本研究では、これらの氾濫因子に関するサブモデルをシームレスに結合した統合氾濫予測モデル（シームレスモデル）を開発し、代表的な都市河川である鶴見川流域に適用した。過去の台風イベントの再現計算によってモデル検証を実施するとともに、ケーススタディを通じて、単一あるいは複合外力に対する流域の氾濫特性を分析した。また、数値予報GPVを利用した予測計算を実施し、リアルタイム予測へのモデル適用性についても考察を行った。

Key Words : inundation analysis, storm surge, integrated flood prediction mode, urbanized coastal area, Tsurumi river basin

1. 研究の目的

都市沿岸部は、河川、下水道および海岸からの影響に対して脆弱性を有しており、近年、このような都市沿岸部が想定を超える事象によって浸水被害を受けるケースが多く見受けられる。著者らは、これまで沿岸域を対象とした津波や高潮等のシミュレーションモデルを構築してきた（図-1）。しかしながら、著しく都市化した沿岸部においては、都市河川や下水道といったインフラの影響を考慮することが、都市沿岸部の防災計画を考える上で非常に重要である。

本研究では、高潮だけでなく、上述の様々な氾濫因子を考慮した統合氾濫予測モデル（シームレスモデル）を開発し、代表的な都市河川である鶴見川流域に適用した。また、ケーススタディを通じて、降雨や高潮が同時に作用した場合等の複合外力に対する流域の氾濫特性を分析

した。さらに、数値予報GPVを入力とした予測解析を行い、リアルタイム予測へのモデルの適用性や課題について考察を実施した。

図-1 GPVデータに基づく東京湾における高潮予測例

2. 対象エリア

研究対象エリアは代表的な都市河川である鶴見川流域（横浜市）である。鶴見川は43kmの流路長を有し、下流区間の低平地には市街地が広がる。また、河口からおよそ15kmの区間は河床勾配が1/1000程度と緩いため、東京湾の潮汐や高潮の影響を強く受ける区間となっている。市街地は下水道ネットワークが整備され、河川や海域との境界は計画高潮位（≒3m）に基づき設計された海岸堤防ならびに河川堤防が整備されている。そのほか、17か所のポンプ排水場、多目的遊水地（面積84ha）、氾濫水を一時的に貯留するための大規模地下貯留管（調整量70万m³）など、総合的な浸水対策が講じられたエリアである（図-2）。

3. モデル構築

本研究で構築した統合氾濫予測モデル（シームレスモデル、図-3）は、①水エネルギー収支分布型流出モデルWEB-DHM、②一次元河道モデル、③下水道ネットワークモデル、④地表面流出モデル、⑤高潮予測モデル、の5つのサブモデルから構成される。それぞれのサブモデルがシームレスに結合され、互いに水位や流量のやり取りが行われる。さらに、降雨、風、気圧等の気象データに基づき、高潮だけでなく強雨や河川洪水といった複合外力による氾濫解析が可能となっている。

(1) 水エネルギー収支分布型水循環モデルWEB-DHM

降雨による河川流出量の算定には、水エネルギー収支分布型水循環モデルWEB-DHM¹⁾を用いた。WEB-DHMは、陸面過程モデルSiB2（Sellorsら²⁾）と、分布型流出モデルGBHM（Yangら³⁾）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壌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。

さらに、鶴見川流域に多く設置されている約4000基の防災調整池による洪水低減効果もモデル化し⁴⁾、落合橋より上流について本モデルを適用した。

(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、後述の(1)(2)式に基づく一次元河道モデルにより解析を行った。解析では、上流端境界において先述の分布型流出モデルWEB-DHMによる計算流量を与え、一方の下流端では後述する高潮予測モデルによる計算潮位を与えた。また、連続式右辺のソース項 q によって、背後地への越流、支川/下水道からの流入を考慮した。なお、マニング粗度係数 n については、観測水位と合うようにチューニングを行い、0.025～0.04の間で区間毎に異なる粗度係数を設

図-2 対象エリア（鶴見川流域，横浜市）

図-3 シームレスモデルの模式図

定した。

(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⁵⁾を用いた。管路ネットワークモデルは複数のLINK（管路部分）およびNODE（マンホール部分）から構成され（図-4）、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]

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

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、 $\sum Q$ ：マンホールでの水の流出入量、 $\sum A_s$ ：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状態である管路を同時解析するため、管渠の天端に幅の狭い仮想的な水路を設けるPreissmanスロットモデルを採用した。スロットモデルでは管路とスロットとの接続点で水面幅が急激に変化することから、流れの状態の変化点で数値的不安定を生みやすい⁷⁾。これを避けるため、管路とスロットの接続部を滑らかに接続した。

(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いることから、雨水流についてもこれを用いて表現することとした。以下にソース項を付加した連続式を示す。

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

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。以上(4)式を用いることで、雨水、内水、外水氾濫による地表面の流れを同一のモデルで取り扱うことができる。

なお、有効降雨の算定にはホートン式による降雨損失および土地利用に基づく浸透率を考慮し、マンホールからの溢水量（流入量）の算定には段落ち式ならびに越流公式による方法⁵⁾を用いた。

(5) 高潮予測モデル

高潮の解析には、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⁾を用いた。本研究の対象エリアに対しては、波によるセットアップは小さいとみなして加味していないが、必要に応じて波浪モデルと同時にラディエーション応力項を追加し、これを考慮することも可能である。

4. モデル検証とケーススタディ

(1) モデル検証

2014年10月の台風18号により発生した鶴見川の大規模出水を対象として、モデル検証を実施した。解析の主な条件を表-1に示す。

a) イベント概要

台風18号によって大きな高潮は発生しなかったものの、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360mmに達し（図-5）、

図-4 管路ネットワークモデル⁹⁾

図-5 都田地点における降雨観測値

図-6 多目的遊水地への流入状況⁹⁾

表-1 主な解析条件一覧

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、早淵川、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（ポンプ排水量はデフォルトの水頭流量表よりモデル化）
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： $n=0.025\sim0.040(\text{m}^{-1/3}\text{s})$ 地表面：土地利用に応じて設定 管渠： $n=0.013(\text{m}^{-1/3}\text{s})$
降雨	XRAIN観測降雨
降雨損失	ホートン式 ($f_0=20\text{mm/h}$, $f_c=8\text{mm/h}$, $k=0.001\text{ s}^{-1}$)

10月6日10時頃には50mm/hを超える猛烈な雨が流域の広範囲で観測された。その結果、鶴見川中流に位置する多目的遊水地（図-6）では過去最大となる154万 m^3 （満容量390万 m^3 ）の洪水調節量を記録し、大規模地下貯留管においてはほぼ100%近い貯留量となった。

b) WEB-DHMによる流出計算

WEB-DHMにより落合橋地点の流出計算を行った。XRAINによる観測降雨を入力降雨とし、計算値をH-Q式に基づく観測流量と比較したところ、概ね良好に再現している事を確認した（図-7）。

c) 河道水位の再現計算

図-7の流出量を基に河道水位の再現計算を実施した。亀の子橋地点の解析結果を図-8に示すが、観測値を概ね良好に再現できている。なお、洪水がピークを過ぎた10月6日17時頃の亀の子橋地点の観測水位にみられる小さなピークは、多目的遊水地の水門開放によるものと思われる。

d) シームレスモデルによる浸水計算

シームレスモデルによる浸水再現結果を図-9に示す。図中の○印はマンホールからの溢水を表し、浸水深によって黄～青で色分けしている。また、下水道管渠については管内水位（満管率）によって色を表示している（赤は満管状態）。やや太い赤線は下水道貯留管（新羽末広幹線）である。この浸水計算結果の妥当性については、浸水実績等の情報と照らし合わせながら確認する必要があるものの、この時間帯では下水道管渠ならびに大規模貯留管はほぼ満管状態となり、特に黒点線で囲んだ2カ所のエリアで浸水規模が大きい結果となった。

e) 洪水調節施設による貯留量

洪水調節施設による貯留量についても比較を行った（表-2）。貯留量の計算値は各施設でイベント期間中の最大値を出力している。下水道貯留管（新羽末広幹線）については実績値とよく一致したが、多目的遊水地の貯留量は1～2割程度過大評価となり、特に越流堤付近の河道水位の予測精度に起因するものと思われる。

(2) ケーススタディ

本節では降雨や高潮に関する感度分析を実施した。

a) 極端な降雨条件に対するケース

まず極端な降雨条件を与えたケースについて検討するにあたり、2014年10月6日出水の再現計算における降雨条件をベースとして、

①観測降雨×1.5倍（最大81mm/h、総雨量501mm）

②観測降雨×2.0倍（最大108mm/h、総雨量668mm）

の2段階の降雨条件を設定した。上記降雨量は計算領域内の平均値である。なお、鶴見川の基本高水で設定されている計画降雨は150年確率降雨（2日間総雨量405mm）で¹⁰⁾、ここで取り扱う2ケースはこれを上回る条件とな

図-7 WEB-DHMによる流出解析結果

図-8 河道水位の再現計算結果（亀の子橋地点）

図-9 浸水計算結果（再現計算）

表-2 洪水調節施設による貯留量の計算結果（ m^3 ）

貯留量\施設名	多目的遊水地	新羽末広幹線
実績値	1,536,000	380,000
計算値	1,852,000	384,100

っている。

解析の結果、降雨の増加に伴って浸水範囲は拡大し、観測降雨を2倍に設定したケースでは、河道水位の計算結果も合わせて判断すると、落合橋～多目的遊水地の区間の左岸で堤防からの越流による外水氾濫が生じる結果となった（図-10中A）。また、降雨量にほぼ比例して、各ポンプ場の積算排水量は増加する傾向となった。

b) 降雨条件に加えて高潮が作用するケース

降雨条件に加えて、さらに高潮が作用したケースについて検討を行った。降雨条件は2014年10月6日出水の再現ケースと同一とし、鶴見川の下流端において、

- ①HWL (=T.P.+1.0m)
- ②HWL+高潮偏差1m
- ③HWL+高潮偏差2m
- ④HWL+高潮偏差3m

の4段階の高潮波形を設定した。④は東京湾における計画高潮位を想定している。なお、図-11は設定した高潮波形であるが、洪水のピーク時間に合わせて、高潮のピーク時間帯を10月6日11時に調整した。

解析の結果、亀の子橋地点より上流では高潮の影響は軽微であることが確認されたが、それよりも下流区間ではその影響が顕著に現れた。浸水解析結果をみると、末吉橋地点より下流域で高潮の影響がみられ、特に④のケースでは河口付近で浸水が顕著にみられた(図-12中B)。これは河川水位が高い、あるいは貯留管が満管である事による下水道からの排水制約が一つの要因と考えられる。以上の感度分析から、鶴見川流域では浸水に対する脆弱性や氾濫因子が場所によって大きく異なる事が示された。

5. リアルタイム予測へのモデル適用

数値予報GPV (MSM) による予測降雨を使用し、リアルタイム予測モデルとしてのモデル適用性を検討した。

(1) 入力降雨の設定方法

浸水予測の際、予測開始時刻 ($t=0$) 以前の降雨履歴も重要となる。そこで、予測開始時刻以前ではXRAIN等の観測降雨が既知であることから、これを入力降雨として計算を常時実行しておき、予測開始の段階で入力降雨をGPV降雨に切り替えて予測計算を行った(図-13)。

(2) 検討結果

2014年10月6日の出水イベントに対して検討を行った。図-14にGPV降雨(初期値10/5 21:00)による浸水状況の予測結果を示すが、観測降雨を用いた計算結果(図-9)と比べて、明らかに小さい結果となっている。大規模地下貯留管においても、観測降雨を用いたケースで100%近い貯留量となったのに対し、GPV降雨を用いたケースでは貯留管への流入はあまり確認できなかった。

これは、予測降雨であるGPVが観測降雨であるXRAINに比べて過小評価となっている事が大きな要因であった。予測降雨としては、他にも、H26年より配信開始となった高解像度の局地数値予報モデルLFMや、観測値ベースの解析雨量である降水ナウキャスト、降水短時間予報等があり、今後の検討課題としたい。なお、15時間分の予

図-10 浸水解析結果 (②観測降雨×2倍のケース)

図-11 モデル高潮波形

図-12 浸水解析結果 (④降雨+高潮偏差3mのケース)

図-13 降雨の設定方法

測計算に要する時間は通常のPCで約20分ほどであり、計算負荷はそれほど大きくはない。

6. まとめ

本研究で得られた主な成果は以下である。

- (1) 都市沿岸部を対象とし、河川、下水道、海岸に関する様々な氾濫因子を考慮した統合氾濫予測モデル（シームレスモデル）を開発した。
- (2) 本モデルを鶴見川下流域に適用し、過去の台風イベントの再現計算を通じてモデル検証を行った。河道水位や洪水調節施設の記録からモデルの妥当性を確認した。
- (3) ケーススタディにより、単一あるいは複合外力による流域の氾濫特性を分析し、浸水に対する脆弱性や氾濫因子が場所によって大きく異なる事を示した。
- (4) リアルタイム予測へのモデル適用に関して検討を実施した。入力降雨の部分で検討の余地があるが、氾濫予測システムとしてのモデル活用も大いに期待される。

謝辞：本研究は、河川砂防技術研究開発ならびに下水道技術研究開発（国土交通省水管理・国土保全局）の補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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,

図-14 GPV降雨に基づく浸水予測結果

Hydrological Processes, Vol. 18, pp.3119-3132, 2004.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) James, W., Rossman, L. E. and James, W. R. C. : USER'S GUIDE TO SWMM5 13TH EDITION, CHI Press.
- 7) 水橋光希, 田島芳満, 佐藤慎司, 佐貫 宏: 地下管路との水の流入出を考慮した津波氾濫モデルの構築土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, pp.I_396-I_400, 2013.
- 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) 鶴見川水系河川整備計画: 国土交通省関東地方整備局, 東京都, 神奈川県, 横浜市, 2007.3.

(2016.3.16 受付)

INUNDATION FORCAST SIMULATION IN URBANIZED COASTAL LOW-LYING AREAS CONSIDERING MULTIPLE FLOOD CAUSING FACTORS

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. Several cases of inundation were examined, in which designed water levels for warning were exceeded. Submodels were seamlessly integrated to simulate inundation caused by tsunami, storm surge, as well as river flood and urban inundation. In the same time, the model evaluated the performance of structural countermeasures such as sewage network, or retardation basin, when considering disaster management plan in coastal low-lying areas. We applied the seamlessly integrated model to the highly urbanized Tsurumi River basin and investigated inundation characteristics by considering multiple flood causing factors.