

都市型水害解析ソフトウェアの開発とその基礎的検証

Development and Basic Verification of Urban Flood Analysis Software

高椋恵¹⁾, 眞鍋尚²⁾, 溝内秀男³⁾

Kei Takamuku, Takashi Manabe and Hideo Mizouchi

1) 修士(工) みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail:
kei.takamuku@mizuho-rt.co.jp)

2) 博士(工学) みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦
町2-3, E-mail: takashi.manabe@mizuho-rt.co.jp)

3) 博士(理学) みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail:
hideo.mizouchi@mizuho-rt.co.jp)

In recent years, flood damage has become more severe and frequent across the country due to the effects of climate change, and there is a continuing concern about the extent of damage. In such a situation, numerical simulation techniques are increasingly important for the physical evaluation of flood assumptions and predictions. This paper describes the urban flood damage analysis software developed by the authors and reports the results of the basic verification conducted for this software.

Key Words : Urban Flood, Surface Flooding, Sewer Overflows, River Flooding

1. はじめに

近年、台風などの集中豪雨や短時間強雨（1時間降水量50mm以上の降雨）が頻発しており、短時間強雨の発生回数は年々増加傾向にある。また台風などの集中豪雨や短時間強雨の増加に伴い、都市部において都市型水害が発生すると、甚大な被害が発生し、復旧までに大幅な費用と時間が必要となる。例えば、令和元年10月に発生した台風第19号では、大雨によって多摩川流域で数ヶ所にわたって氾濫が発生し、一戸建て住宅やタワーマンションで浸水被害が発生した。浸水被害を低減するために、自治体はハード面とソフト面の両方で水害対策を行っている。ハード面の対策としては、河川の堤防の補強、雨水貯留施設の増設、排水施設の整備や避難所の整備などがある。一方、ソフト面の対策は、内水・洪水ハザードマップの整備^{[1][2]}、リアルタイムの降雨・浸水状況や迅速な避難のための情報発信^[3]などがある。このような状況の中、国土交通省では『気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～』が取りまとめられ^[4]、流域治水の考え方を取り入れた水災害対策の推進に取り組んでいる。この流域治水は「気候変動の影響による水災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域（雨水が河川に流入する地域）から氾濫域（河川等の氾濫により浸水が想定される地域）にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して水災害対策を行う考え方」^[5]であり、流域全体で多層的に水害対策を推進するものである。一方、これまでにもハ

ド・ソフト面の対策の定量的評価において、氾濫解析に関する数値シミュレーションの活用は盛んにおこなわれており、流域治水の推進に伴い、今後もさらに重要性が増していくものと思われる。

数値シミュレーションモデルの発展に目を向けると、これまで洪水（外水）氾濫^[6]、内水氾濫^[7]の定量的な評価のためのモデルが提案されている。都市型水害解析を行うために解析ソルバーに必要となる機能^[8]は、地表面に降った雨水やマンホールおよび河川からの氾濫水を取り扱うための地表面氾濫解析機能、マンホール内部に流入する雨水や管きょ内を流れる雨水を取り扱うための下水道解析機能、河川を流れる水を取り扱うための河川解析機能などである。著者らはこれらの機能を有するソフトウェアMC-FLOODを開発し、地表面氾濫解析機能の検証を実施^[9]してきた。本論では地表面氾濫解析機能に加え、その他の機能を含めた都市型水害解析ソフトウェアの開発と基本的な検証に関して報告するものである。

2. 都市型水害解析モデル

(1) 降雨損失モデル

降雨損失モデルは降雨量に対して、有効降雨を算定するモデルである。MC-FLOODにおいて、表-1に示すモデルを組み込んでいる。本論では流出係数を乗じて有効降雨を求める。

$$r_e = f \cdot r \quad (1)$$

ここで、 r_e ：有効降雨量[mm・h⁻¹]、 f ：流出係数[-]、 r ：実

表-1 降雨損失モデルと表面流出モデルの種類

No	降雨損失モデル	No	表面流出モデル
1	一様浸透損失モデル	1	タイムエリア法
2	ホートンモデル	2	非線形貯留法
3	流出係数モデル	3	二重線形貯留法
4	一様浸透モデル	4	線形貯留法
5	f1-Rsaモデル	5	Kadoya法
6	Green-Amptモデル	6	ラショナル法(合理式)
7	Hornerモデル	7	(SCS) 単位図法

績降雨量[mm・h⁻¹]である。

(2) 表面流出モデル

表面流出モデルは、人孔に流入する流量を有効降雨から算定するモデルである。MC-FLOODにおいて、表-1に示すモデルを組み込んでいる。本論ではよく用いられる合理式を用いて、先に算出した有効降雨量から人孔に流入する流量を求める。

$$Q = \frac{1}{3.6} r_e A \quad (2)$$

ここで、Q：人孔流入量[m³・s⁻¹]、A：集水域[km²]である。

(3) 地表面氾濫解析モデル

地表面氾濫解析モデルは、3次元の非圧縮性流体の基礎方程式に浅水流近似を施した連続の式(3)および運動方程式(4)、(5)を使用する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_{rain} + q_{manhole} + q_{river} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、h：水深[m]、u：x方向断面平均流速[m・s⁻¹]、v：y方向断面平均流速[m・s⁻¹]、M(=uh)：x方向流量フラックス[m²・s⁻¹]、N(=vh)：y方向流量フラックス[m²・s⁻¹]、H：水位[m]、t：時間[s]、g：重力加速度[m・s⁻²]、n：マニングの粗度係数[s・m^{-1/3}]、q_{rain}：降雨量[m・s⁻¹]、q_{manhole}：マンホールからの溢水量[m・s⁻¹]、q_{river}：河川からの越水量[m・s⁻¹]である。

(4) 下水道解析モデル

下水道解析モデルは、管きょについては、次に示す連続の式(6)と運動方程式(7)を使用する。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial(U_s Q_s)}{\partial x} \\ = -g A_s \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、A_s：流水断面積[m²]、Q_s：管きょ内の流量[m³・s⁻¹]、U_s：管きょ内の断面平均流速[m・s⁻¹]、H：水位[m]、n_s：管きょのマニングの粗度係数[s・m^{-1/3}]、R_s = A_s/S_s：管きょの径深[m]、S_s：管きょの潤辺[m]、t：時間[s]、g：重力加速度[m・s⁻²]である。

式(7)に満管状態を開水路と同じように解析することができるプライスマンスロットモデルを適用すると、A_sは式(8)のように表される。

$$A_s = \begin{cases} A_{so} & (A_s \leq A_{so}) \\ A_{so} + \frac{Ba^2}{g} & (A_s > A_{so}) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、A_{so}：管きょの流水断面積[m²]、A_{so}：管渠の断面積[m²]、B：スロット幅[m]、a：圧力波の伝搬速度[m・s⁻¹]、g：重力加速度[m・s⁻²]である。

また、マンホールについては、次に示す連続の式(9)を使用する。

$$F A_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum Q_{sin} + Q_{in} - Q_{out} \quad (9)$$

ここで、A_m：マンホールの断面積[m²]、h_m：マンホール内の水深[m]、t：時間[s]、Q_{sin}：管きょからの流入流量[m³・s⁻¹]、Q_{in}：地表面からマンホールへの流入流量[m³・s⁻¹]、Q_{out}：ポンプの排水流量[m³・s⁻¹]である。

(5) 河川解析モデル

河川解析モデルは、次に示す連続の式(10)と運動方程式(11)を使用する。

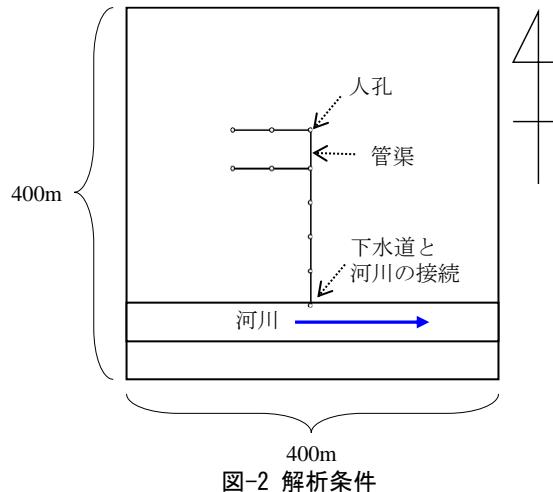
$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r + q_s \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_r}{\partial t} + \frac{\partial(U_r Q_r)}{\partial x} \\ = -g A_r \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn_r^2 Q_r |U_r|}{R_r^{4/3}} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、A_r：河川の流水断面積[m²]、Q_r：河川の流量[m³・s⁻¹]、U_r：河川の断面平均流速[m・s⁻¹]、H：水位[m]、n_r：河川のマニングの粗度係数[s・m^{-1/3}]、R_r = A_r/S_r：河川の径深[m]、S_r：河川の潤辺[m]、t：時間[s]、g：重力加速度[m・s⁻²]である。

(6) 計算手法

a) 離散化



地表面氾濫解析モデルはデカルト座標系とし、差分法により空間的に離散化する。また水深 h とxy方向流量フラックスを互い違いに配置するスタッガード格子を用いる^[6]。式(4)および式(5)における左辺第2項、第3項については1次精度風上差分を用い、それ以外の空間微分には中央差分を用いる。時間方向には2次精度であるLeap-Frog法を用いて時間積分する。さらに式(4)および式(5)における右辺第2項については半陰解法^[6]を用いる。下水道解析および河川解析モデルは地表面氾濫と同様に離散化する。

b) ドライベッドの取り扱い

地表面氾濫解析モデルでは、河川からの越流時もしくは人孔からの溢水時において解析を始める。また、浸水した箇所（ウェットベッド）から浸水していない箇所（ドライベッド）へと水が移動する現象を解く必要がある。MC-FLOODでは計算の安定性を考慮して、ウェットベッドとドライベッドの境界部分では段落ちや越流を仮定した流量公式により流量フラックス M , N を算定する。

c) 越流・溢水の取り扱い

地表面氾濫は河川からの越水もしくは人孔からの溢水により発生する。河川からの越水は式(10)および式(11)により時々刻々計算される水位が河川堤防高さを超えた場合に式(3)の右辺第3項により考慮する。越水量については本間の公式^[10]により算定する。

人孔からの溢水も河川堤防と同様に、人孔内の水位が地表面高さを超えた場合に式(3)の右辺第2項により考慮する。なお、本来、洪水ハザードマップ等の検討では、破堤を考慮するが、本検討では都市域の河川を想定して越水のみを考慮する。

3. 解析条件

(1) 地表面、下水道、河川の条件

MC-FLOODにより、内水および外水氾濫の現象を評価できるか否かを確認することに主眼を置き数値シミュレーションを実施する。

降雨損失モデルは先ほど述べたとおり、降雨量に対して流出係数を乗じたものを有効降雨量とする。表面流出モデルでは、各人孔集水域を400m²として、有効降雨量に

表-2 解析条件

解析モデル	解析条件
降雨損失モデル	選択モデル：流出係数モデル 流出係数 f ：0.8
表面流出モデル	選択モデル：合理式 各人孔集水域：400m ² 洪水到達時間：10min
下水道解析モデル	人孔径：0.6m 管きよ径：0.3m 管路勾配：2% 管路断面形状：円管 下流端：河川と接続
河川解析モデル	河床勾配：1/3000 断面形状：矩形 川幅：20m
地表面氾濫解析モデル	メッシュサイズ：5m x方向：80分割 y方向：80分割 メッシュ数：6,400 標高：対象区域全体にわたって0m 粗度係数：対象区域全体にわたって0.05m ^{-1/3} s

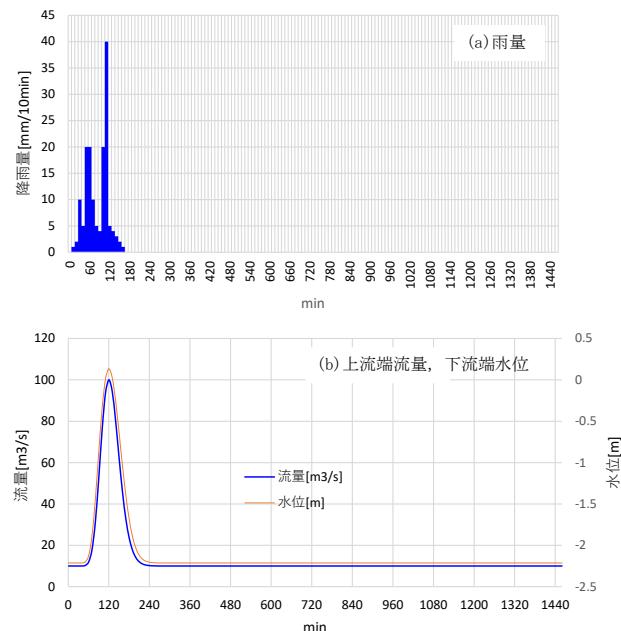


図-3 降雨量、河川の流量・水位

対して合理式を用いて人孔流入量を算定する。下水道解析モデルでは人孔径を0.6m, 管きよ径を0.3m, 管路勾配を2%として設定する。最下流端では河川と接続する設定とする。河川解析モデルでは矩形断面を想定し、河床勾配を1/3000、川幅を20mとする。地表面氾濫解析モデルではメッシュサイズを5mとし、東西方向、南北方向をそれぞれ80分割したメッシュとする。標高については河川を除いて0m、粗度係数は0.05 s · m^{-1/3}とする。その他の条件を含めて表-2に示す。また河川や下水道の平面配置を図-2に示す。

(2) その他境界条件

地表面、下水道、河川の配置のほかに、外力を設定する必要がある。本検討では、人孔から流入する降雨量および河川上流端からの流入量および河川下流端での水位変動を与える。外力として与えた降雨量および河川の境界条件である流量・水位を図-3に示す。

4. 計算結果と検証

(1) 計算結果

計算開始から100分後～120分後の浸水深分布を図-4に示す。100分後では人孔からの溢水により地表面が浸水し始めている。これは、降雨量に対して、下水道での流下能力が足りずに、人孔から溢水するためである。110分後には河川から越水が始まり、上流から浸水している様子が分かる。また、下水から溢水した水が広がりを見せている。120分後には河川からの氾濫が卓越し、河川左岸側の浸水域が110分後と比較して拡大している様子が見て取れる。

5. おわりに

本論では、都市型水害に焦点を当て、都市型水害解析ソフトウェアを開発するとともに、簡単な事例を作成し、その結果について検証した。

- 降雨損失モデル、表面流出モデル、下水道解析モデル河川解析モデル、地表面氾濫解析モデルをそれぞれ開発した。
- 事例計算により、人孔からの溢水、河川からの越水の状況を定量的に評価できることを確認した。

開発したソフトウェアは本論で検討したもの以外の機能も有しており、それらの機能の検証も実施予定である。併せて、実データでの検証を進めるとともに課題を抽出し、都市型水害解析ソフトウェアの改良を進める。

参考文献

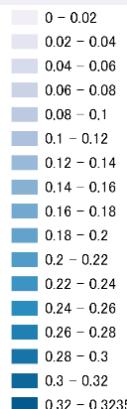
- [1] 国土交通省 水管理・国土保全局: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）平成27年7月。
- [2] 国土交通省水管理・国土保全局下水道部: 内水浸水想定区域図作成マニュアル（案）令和3年7月。
- [3] 国土交通省：川の防災情報（<https://www.river.go.jp/index>）。
- [4] 国土交通省: 気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～,答申,令和2年7月。
- [5] 国土交通省：流域治水の推進（<https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/index.html>）。
- [6] 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文: 泛濫水の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-2, pp.305時 317, 1980.
- [7] 関根正人: 住宅密集地を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.2, 70-85, 2011
- [8] 公益財団法人 日本下水道新技術機構: 流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き）, 2017年3月。
- [9] 公益財団法人 日本下水道新技術機構: 下水道施設の耐水化計画および対策立案に関する手引き, 2017年3月。
- [10] 国土交通省 水管理・国土保全局: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）, 平成27年7月。

耐水化計画および対策立案に関する手引き, 2017年3

月。

- [10] 国土交通省 水管理・国土保全局: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）, 平成27年7月。

浸水深[m]



(a) Time=100min

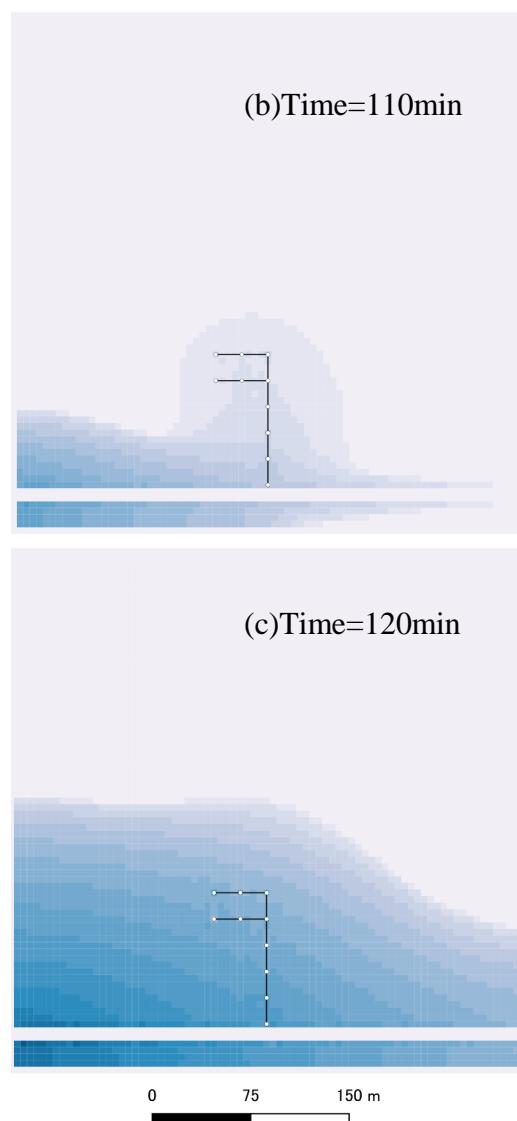


図-4 浸水深分布