

都市型水害解析の現状と展望

高橋昌伸ⁱ 溝内秀男ⁱⁱ 眞鍋尚ⁱⁱⁱ

Overview of Urban Flood Analysis

Masanobu TAKAHASHI Hideo MIZOUCHI Takashi MANABE

当社では、これまで「都市型水害予測解析システム」を用いた受託解析を十数年にわたって行ってきた実績があり、その経験とノウハウを基に、今般、新規に都市型水害ソルバーのプロトタイプを開発した。本稿では、まず、国内で広く利用されている代表的な都市型水害解析ソフトウェアの特徴について述べる。つぎに、開発した都市型水害ソルバーの機能の概要および基礎的な検証事例を紹介する。

(キーワード): 都市型水害, 地表面氾濫解析, 下水道解析, 河川解析

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）が頻発している。図 1 は全国のアメダス設置地点による 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の 1976 年から 2019 年までの経年変化を示したものであるが、短時間強雨の発生回数は年々増加傾向にあることがわかる。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、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などがある。自治体が公開している内水・洪水ハザードマップのほとんどは、海外製の都市型水害解析ソフトウェアによる計算結果を基に作成されているという現状がある。

現在、国内で使用されている都市型水害ソフトウェアは外国産であり、国産ソフトウェアの出現が望まれている。当社では十数年前から、当社のシミュレーション技術を用いて、ソフト面での水害対策を行うための受託解析を数多く行ってきた実績がある。その経験とノウハウをベースに、今般、国産の都市型水害解析ソフトウェアの開発を行うこととし、その 1st Step として新規に都市型水害ソルバーのプロトタイプを開発した。本稿では、まず、国内で広く利用されている代表的な都市型水害解析ソフトウェアの特徴について述べる。つぎに、開発した都市型水害ソルバーの機能の概要および基礎的な検証事例を紹介する。

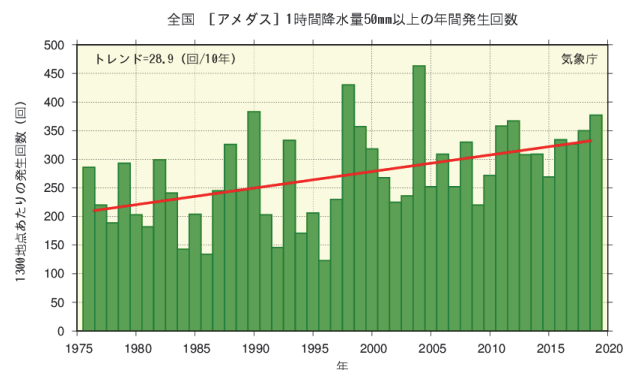


図 1 全国の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の経年変化（1976～2019 年）¹⁾

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 主任コンサルタント

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席主任コンサルタント 博士（理学）

ⁱⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 次長 博士（工学）

2 代表的な都市型水害解析ソフトウェアの特徴

都市型水害解析を行うために解析ソルバーに必要な機能は、地表面に降った雨水やマンホールや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よ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の三つの機能である。

本章では、公益財団法人下水道新技術機構が発行している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）²⁾や国土交通省国土技術政策総合研究所が発行している都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン（案）³⁾に掲載されており、国内で広く利用されている代表的な都市型水害解析ソフトウェアについて、解析ソルバーの主要な機能の特徴について述べる。

2.1 InfoWorks ICM

InfoWorks ICM⁴⁾は、米国の Innowyze®社が開発した下水道・河川統合解析ソフトウェアである。都市下水道と河川流域と氾濫原等の流域全体のモデリングと統合解析を単一ソフトウェアで実現できるのが特徴である。地表面氾濫解析では、非構造格子のみが利用できる。解析機能が充実しており、国内の多くの建設コンサルタントが使用している。InfoWorks ICM の解析ソルバーの主要な機能の特徴を表 1 に示す。

2.2 MIKE FLOOD

MIKE FLOOD⁵⁾は、デンマーク水理環境研究所が開発したシステムであり、下水道解析ソフトウェア MIKE URBAN と河川解析ソフトウェア MIKE 11 および地表面氾濫解析ソフトウェア MIKE 21 を統合するためのソフトウェアである。モデリングはそれぞれのソフトウェアで行い、河川と下水道の接続等は MIKE FLOOD で行う。下水道・河川・地表面の統合解析は MIKE FLOOD 上で行うことができる。地表面氾濫解析単独では、構造格子と非構造格子の両方が使用できるが、統合解析を行う場合には構造格子のみが使用できる。非営利機関が開発したソフトウェアであるためライセンス費用と年間保守費用は InfoWorks ICM と比較すると低額である。表 1 に MIKE FLOOD (MIKE URBAN+MIKE 11+MIKE 21) の解析ソルバーの主要な機能の特徴について示す。

2.3 xpswmm

xpswmm⁶⁾は、アメリカ環境保護庁の指導・援助により、Metcalf and Eddy 社、フロリダ大学、Water Resource Engineers 社の 3 機関によって開発されたソルバーに、オーストラリアの XP Solutions 社のプリ・ポストのインターフェース機能を付けたソフトウェアである。なお、XP Solutions 社と Innowyze 社は 2017 年に合併したため、現在は Innowyze 社が xpswmm の開発を行っている。表 1 に xpswmm の解析ソルバーの主要な機能の特徴を示す。

2.4 NILIM2.0

NILIM2.0⁷⁾は、国土交通省国土技術政策総合研究所が開発した都市域氾濫解析モデルで、内水氾濫を対象とした管路網モデルと氾濫原メッシュモデル（平面二次元）を組み合わせた NILIM1.0 を基礎に、旧土木研究所が開発した一次元不定流による河道モデル等による外水流出入量の算定等を表現できるモデルである。NILIM2.0 の解析ソルバーの主要な機能の特徴について表 1 に示す。

3 都市型水害解析ソルバーの解析モデル

今回開発した都市型水害ソルバーの機能を表 1 に示す。また、解析モデルの詳細を以下に示す。なお、本ソルバーの地表面氾濫解析機能は、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⁸⁾において、InfoWorks ICM と同等の性能を有すると認められている。

3.1 地表面氾濫解析

地表面氾濫解析モデルは、次に示す連続の式(1)および二次元不定流モデル(2)、(3)を使用する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_{rain} + q_{manhole} + q_{river} \quad (1)$$

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

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

表1 各ソフトウェアのソルバーの機能の比較

ソフトウェア名称	InfoWorks ICM	MIKE FLOOD (MIKE URBAN+MIKE 21 +MIKE 11)	xpswmm	NILIM 2.0	(仮) 都市型水害ソルバー
開発元	・イギリス水理研究所 ・ウォーリングフォード 水理研究所 ・米国 Innovyze 社	・デンマーク水理環境研究所	・Metcalf and Eddy 社 ・フロリダ大学 ・Water Resource Engineers 社 ・XP Solutions 社 ・米国 Innovyze 社	・国土交通省 国土技術政策総合研究所	・みずほリサーチ&テクノロ ジーズ株式会社
降雨損失モデル	・一様損失モデル ・流出係数モデル ・Horton モデル ・Green-Ampt モデル 等	・一様損失モデル ・流出係数モデル ・Horton モデル 等	・一様損失モデル ・流出係数モデル ・Horton モデル ・Green-Ampt モデル 等	・一様損失モデル	・一様損失モデル* ・流出係数モデル ・Horton モデル ・Green-Ampt モデル*
表面流出モデル	・Kinematic Wave 法 ・非線形貯留法 ・二重線形貯留法 等	・Kinematic Wave 法 ・タイムエリア法 等	・非線形貯留法 ・Kinematic Wave 法 ・Laurenson 法 等	・Kinematic Wave 法	・Kinematic Wave 法 ・非線形貯留法 ・二重線形貯留法 ・タイムエリア法*
地表面氾濫解析モデル	・二次元不定流モデル	・二次元不定流モデル	・二次元不定流モデル	・二次元不定流モデル	・二次元不定流モデル
下水道解析モデル	・Dynamic Wave モデル	・Dynamic Wave モデル	・Dynamic Wave モデル	・Diffusion Wave モデル	・Dynamic Wave モデル
河川解析モデル	・一次元不定流モデル	・一次元不定流モデル	・一次元不定流モデル	・一次元不定流モデル	・一次元不定流モデル
管きよ	・円形, 矩形, 馬蹄型, ユーザ定義による任意形 等	・円形, 矩形, O 型, 卵型, ユーザ定義による任意形 等	・円形, 矩形, 馬蹄型, 楕円型, 卵型, 半円型, ユーザ定義による任意形 等	・円形, 矩形	・円形, 矩形, ユーザ定義による任意形*
マンホール	・形状に関係なく断面積で 与える	・円形 ・形状に関係なく断面積で 与える	・形状に関係なく断面積で 与える	・形状に関係なく断面積で 与える	・円形, 矩形 ・形状に関係なく断面積で 与える*
水理構造物	・ポンプ, バルブ, 堰, オリフィス, ゲート, 圧力 (密閉型) マンホール 等	・ポンプ, バルブ, 堰, オリフィス, ゲート, 圧力 (密閉型) マンホール 等	・ポンプ, バルブ, 堰, オリフィス, ゲート, 圧力 (密閉型) マンホール 等	・ポンプ, 堰, オリフィス, ゲート	・ポンプ, バルブ, 堰, オリフィス, ゲート, 圧力 (密閉型) マンホール*
地表面氾濫解析格子	・非構造格子	・構造格子	・構造格子	・構造格子	・構造格子 ・BCM 格子*
雨水移動可視化モデル	・なし	・なし	・なし	・なし	・質量保存則に基づくモデル

本表は、「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）公益財団法人日本下水道新技術機構」と「都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン（案）国土交通省国土技術政策総合研究所」を参考に作成した。

*赤字は本年度以降に実装を予定しているモデル

ここで、 h : 水深[m], u : x 方向流速[m/s], v : y 方向流速[m/s], $M(=uh)$: x 方向流量フラックス[m²/s], $N(=vh)$: y 方向流量フラックス[m²/s], z : 地盤高[m], t : 時間[s], g : 重力加速度[m/s²], n : マニングの粗度係数[s/m^{1/3}], q_{rain} : 降雨量[m/s], $q_{manhole}$: マンホールからの溢水量[m/s], q_{river} : 河川からの溢水量[m/s]である。

3.2 下水道解析

下水道解析モデルは、管きよについては、次に示す連続の式(4)と一次元不定流モデル(Dynamic Wave モデル) (5)を使用する。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial (U_s Q_s)}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial (z_s + h_s)}{\partial x} - \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \tag{5}$$

ここで、 A_s : 流水断面積[m²], Q_s : 管きよ内の流量[m³/s], U_s : 管きよ内の流速[m/s], z_s : 管底高[m], h_s : 管きよ内の水深[m], n_s : 管きよのマニングの粗度係数[s/m^{1/3}], $R_s = A_s/S_s$: 管きよの径深[m], S_s : 管きよの潤辺[m], t : 時間[s], g : 重力加速度[m/s²]である。

式(5)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(6)のように表される。

$$A_s = \begin{cases} A_{s0} & (A_s \leq A_{s0}) \\ A_{s0} + \frac{B a^2}{g} & (A_s > A_{s0}) \end{cases} \tag{6}$$

ここで、 A_{s0} : 管きよの流水断面積[m²], A_{s0} : 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], g : 重力加速度[m/s²]である。

また、マンホールについては、次に示す連続の式(7)を使用する。

$$A_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum Q_{sin} + Q_{in} - Q_{out} \quad (7)$$

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} ：管きよからの流入流量[m³/s]、 Q_{in} ：地表面からマンホールへの流入流量[m³/s]、 Q_{out} ：ポンプの排水流量[m³/s]である。

3.3 河川解析

河川解析モデルは、次に示す連続の式(8)と一次元不定流モデル(9)を使用する。

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r + q_s \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_r}{\partial t} + \frac{\partial (U_r Q_r)}{\partial x} = -g A_r \frac{\partial (z_r + h_r)}{\partial x} - \frac{g n_r^2 Q_r |U_r|}{R_r^{4/3}} \quad (9)$$

ここで、 A_r ：河川の流水断面積[m²]、 Q_r ：河川の流量[m³/s]、 U_r ：河川の流速[m/s]、 z_r ：河床高[m]、 h_r ：河川の水深[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/s²]である。

4 検証事例

本章では、今回開発した都市型水害ソルバーの基礎的な検証事例を示す。

4.1 解析体系

解析体系を図2に示す。赤枠で囲まれた領域とマンホールと管きよと河川が解析対象である。

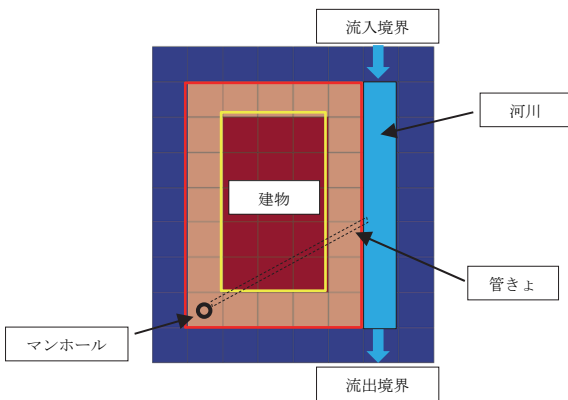


図2 解析体系

赤枠の中央には建物があり、その地下には管きよが通っている。管きよの上流側はマンホールに接続しており、管きよの下流側は河川に接続している。赤枠で囲まれた領域に雨を降らせると、降った雨がマンホールに流入する。マンホールに流入した雨は、マンホールに接続している管きよ内を流れ、最終的には河川へ流出する。

4.2 解析条件

降雨条件を図3に示す。解析時間は360分で、解析開始後30分から150分まで108[mm/h]の雨が降る条件とした。河川の初期水深は1[m]で、初期の流量は0.5[m³/s]、河川上流は流量0.5[m³/s]で一定の境界条件、河川下流は水深1[m]で一定の境界条件を与えた。また、マンホールの初期水深は0.1[m]とした。

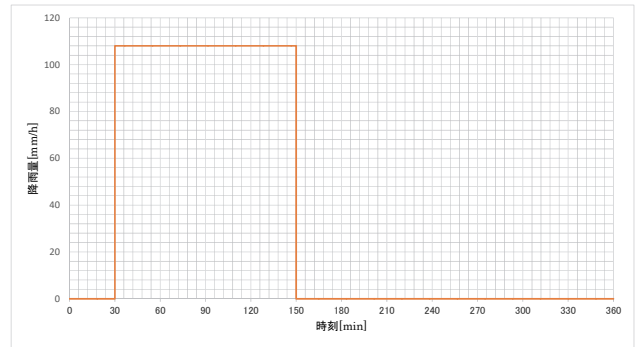


図3 降雨条件

4.3 解析結果

図4に解析体系全体の水量を比較したグラフを示す。また、1時間毎の浸水深分布を図5に示す。さらに、1時間毎のマンホール・管きよ・河川の水位断面分布を図6(a)から(f)に示す。図5から、時刻60分から時刻120分にかけては、降雨が継続しているため、解析領域内の浸水深が増加していることがわかる。180分から360分にかけては、雨が止んでいるため、マンホールからの排水により、解析領域内の浸水深は全体的に減少していることがわかる。また、地表面からマンホールに流入した雨水は、管きよへ流入し、河川へ滞りなく流出していることが図6(a)から(f)によりわかる。

解析領域内に初期に存在する水は、河川の水とマンホール内の水のみである。解析領域に流入する水は、降雨による水と河川上流から流入する水であり、解析領域から流出する水は、河川下流から流出する水である。図4から、マンホール初期水量と河川初

期水量と累積降雨量と河川流入量の総和から河川流出量を引いた量と、地表面総水量とマンホール総水量と管きょ総水量と河川総水量の総和の量が一致していることから、解析領域内の質量は保存されていることがわかる。

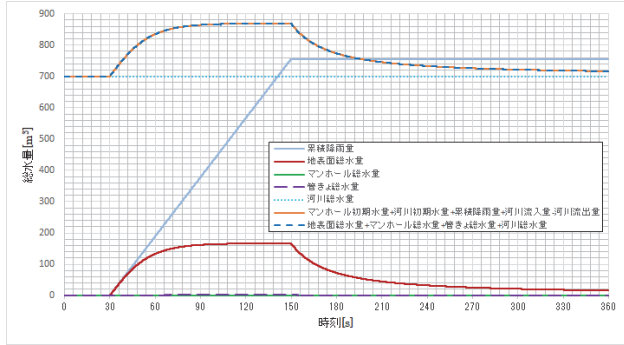


図4 解析体系全体の質量保存の確認

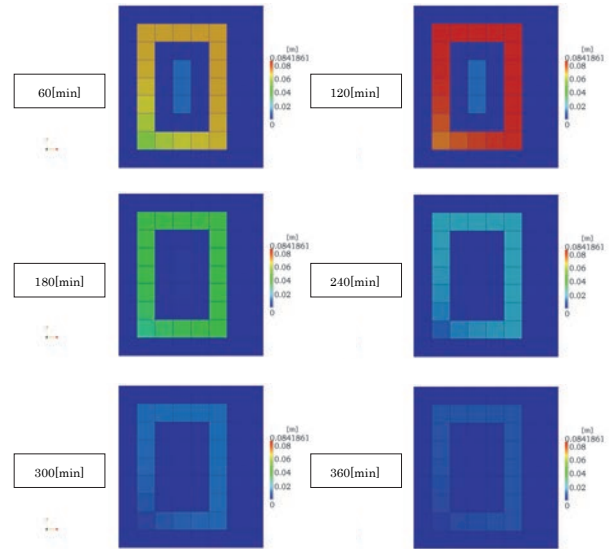
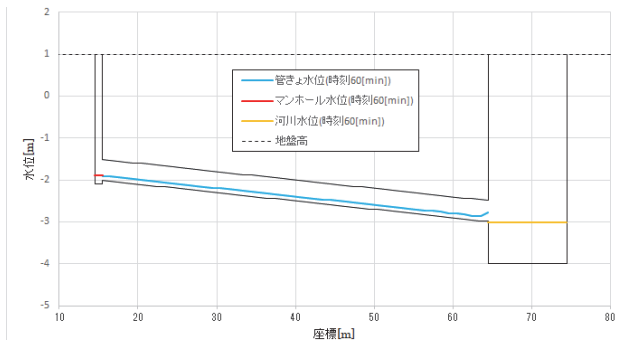
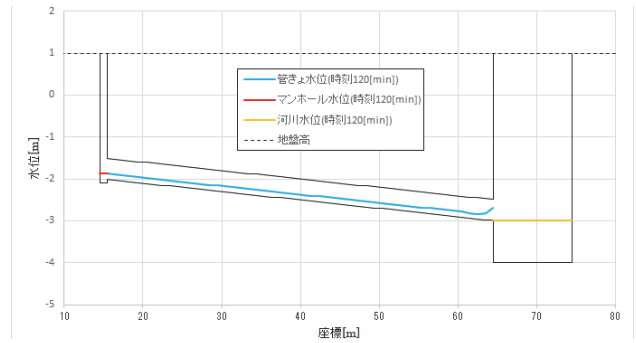


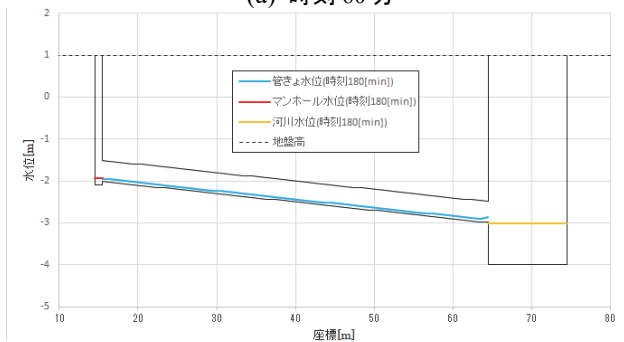
図5 浸水深分布



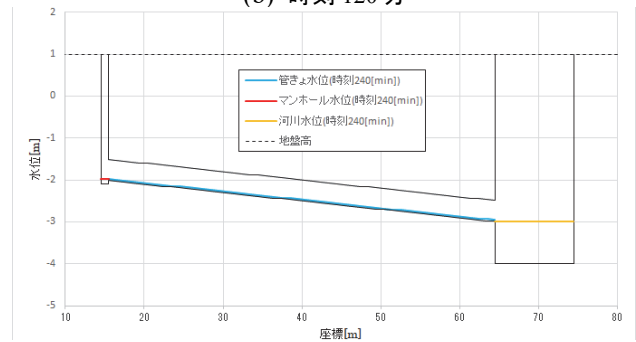
(a) 時刻 60 分



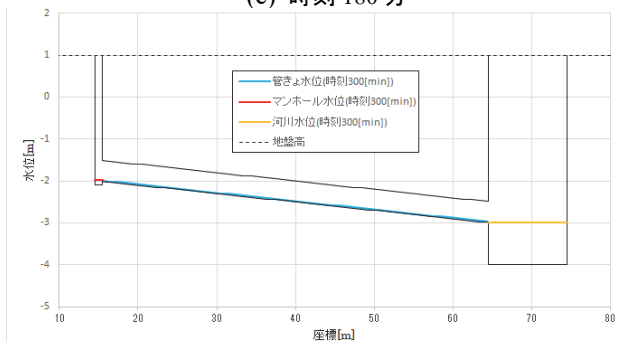
(b) 時刻 120 分



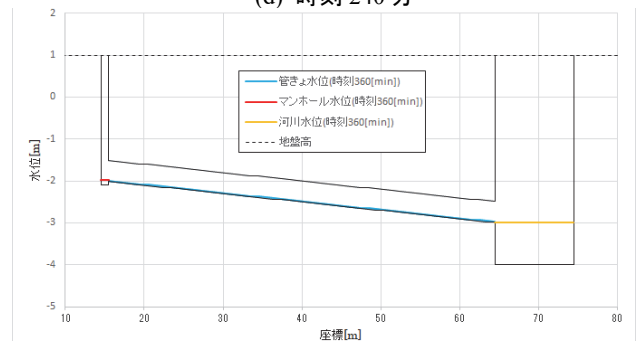
(c) 時刻 180 分



(d) 時刻 240 分



(e) 時刻 300 分



(f) 時刻 360 分

図6 マンホール・管きょ・河川の水位断面

5 おわりに

本稿では、都市型水害解析の現状と開発した都市型水害ソルバーの機能および基礎的な検証事例について述べた。

今後は、開発した都市型水害ソルバーの高度化を図るとともに、実地体系での検証を進め、都市型水害の予測に貢献していく。

引用文献

- 1) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 2) 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），公益財団法人 日本下水道新技術機構，2017年3月，p7-9
- 3) <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0202pdf/ks0202.pdf>, p10-12
- 4) <https://www.innovyze.com/en-us/products/infoworks-icm>
- 5) <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-flood>
- 6) <https://www.forum8.co.jp/product/uc1/gesui/xpswmm.htm>
- 7) <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhwp/seika.files/nilim/download/manual.pdf>
- 8) 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，公益財団法人 日本下水道新技術機構，2021年3月，p 337-359

Innovyze® は Innovyze 社の登録商標です。