

都市型水害に対応した氾濫解析手法について

The flood analysis technique corresponds to urban water disaster

北野真広¹・和田高広²・石徹白伸也³

Masahiro KITANO, Takahiro WADA and Shinya ITOSHIRO

¹ 八千代エンジニアリング 総合事業本部 河川部(〒161-8575 東京都新宿区西落合 2-18-12)

² 八千代エンジニアリング 総合事業本部 河川部(〒161-8575 東京都新宿区西落合 2-18-12)

³ 八千代エンジニアリング 北陸支店 技術部(〒950-0088 新潟市中央区万代 1-1-1)

1. はじめに

近年、流域においては市街化に伴う保水・遊水機能の低下、局所的な集中豪雨の多発により、都市型水害が各地で相次いでおり、都市部での浸水被害対策が重要な課題となっている。こうした背景を受けて、「特定都市河川浸水被害対策法(平成16年5月)」が施行され、河川管理者と下水道管理者が共同して外水・内水対策を講じることとなった。また、都市型水害の特徴の一つである内水による浸水は、河川の破堤や越水による外水氾濫よりも発生頻度が高く、被害の割合が大きいことなど、社会経済的観点からも「内水ハザードマップ」の重要性が高まっており、「特定都市河川流域」の指定を受けた自治体、平成18年度に創設された「下水道総合浸水対策緊急事業」においても、下水道区域を対象に内水ハザードマップを作成することになっている。

一方、都市部の浸水は、河川からの破堤・越水・溢水等による外水氾濫、地形的な要因や下水道等の排水能力不足による内水氾濫が混在し、複雑な状況を呈している。こうした中で、浸水被害対策の検討やハザードマップを作成するためには、この複雑な浸水現象を氾濫解析によって予測する必要があるが、従来の氾濫解析モデルでは、下水道網を詳細に表現したモデルや、下水道網の雨水流出解析において下水道管から溢れた後の地表の流下、貯留等の現象の再現がほとんどなされていない。

今回紹介する都市型水害解析モデル(「流域一体型氾濫解析モデル」、「市街地氾濫解析モデル」)は、特に都市部での浸水状況を予測するために、地表面の流出・氾濫解析、下水道管路流解析および河川流解析を同一の場で解析することができ、河川、下水道を一体的に捉えることが可能となった。また、既往洪水による浸水状況の再現性について検証を行った。

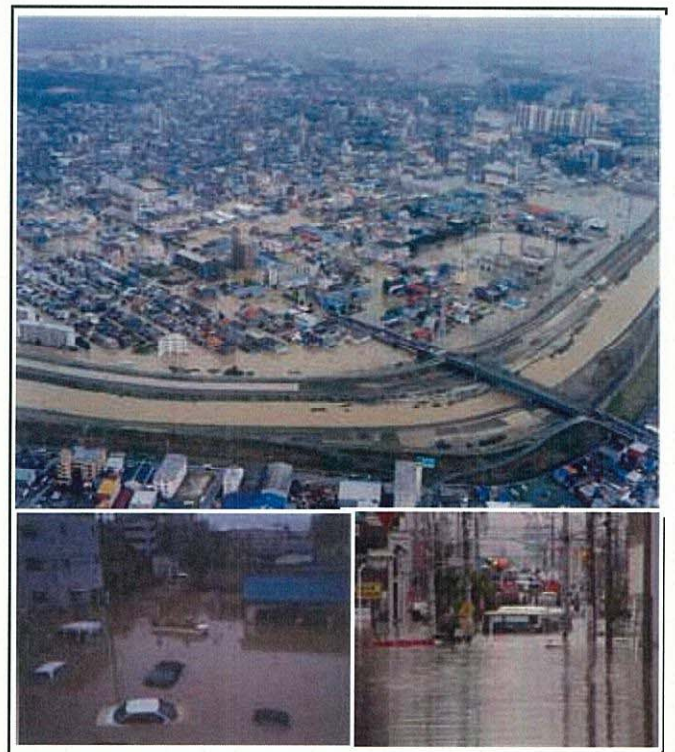


写真-1 近年の都市型水害による被害状況

2. 流域一体型氾濫解析モデル

(1) 流域一体型氾濫解析モデルの概要

都市型水害解析モデルの基本構造の模式図および概要一覧について図-1、表-1にそれぞれ示す。本モデルの基本構造は、流域全体を流出域と氾濫原に分離し、流出域から氾濫原に流量を受け渡す構造となっており、大きくは①全流域(メッシュ)に土地利用別の損失現象を考慮し時系列分布を直接与える『有効降雨モデル』、②

河川への強制排水、河口潮位を反映し、越水・破堤を表現した『河道追跡モデル(一次元不定流)』、③山間部の地形特性、流路に従い洪水を追跡した『流出域モデル(Kinematic Wave 法)』、④平地部における地形特性の他に水路・下水道・排水機場による排水路網、盛土等

が与える影響下で氾濫流の伝播を追跡した『氾濫原モデル(平面二次元不定流)』¹⁾からなり、降雨を与えるだけで、流出過程、氾濫過程を一体的に解析することができるモデルとなっている。

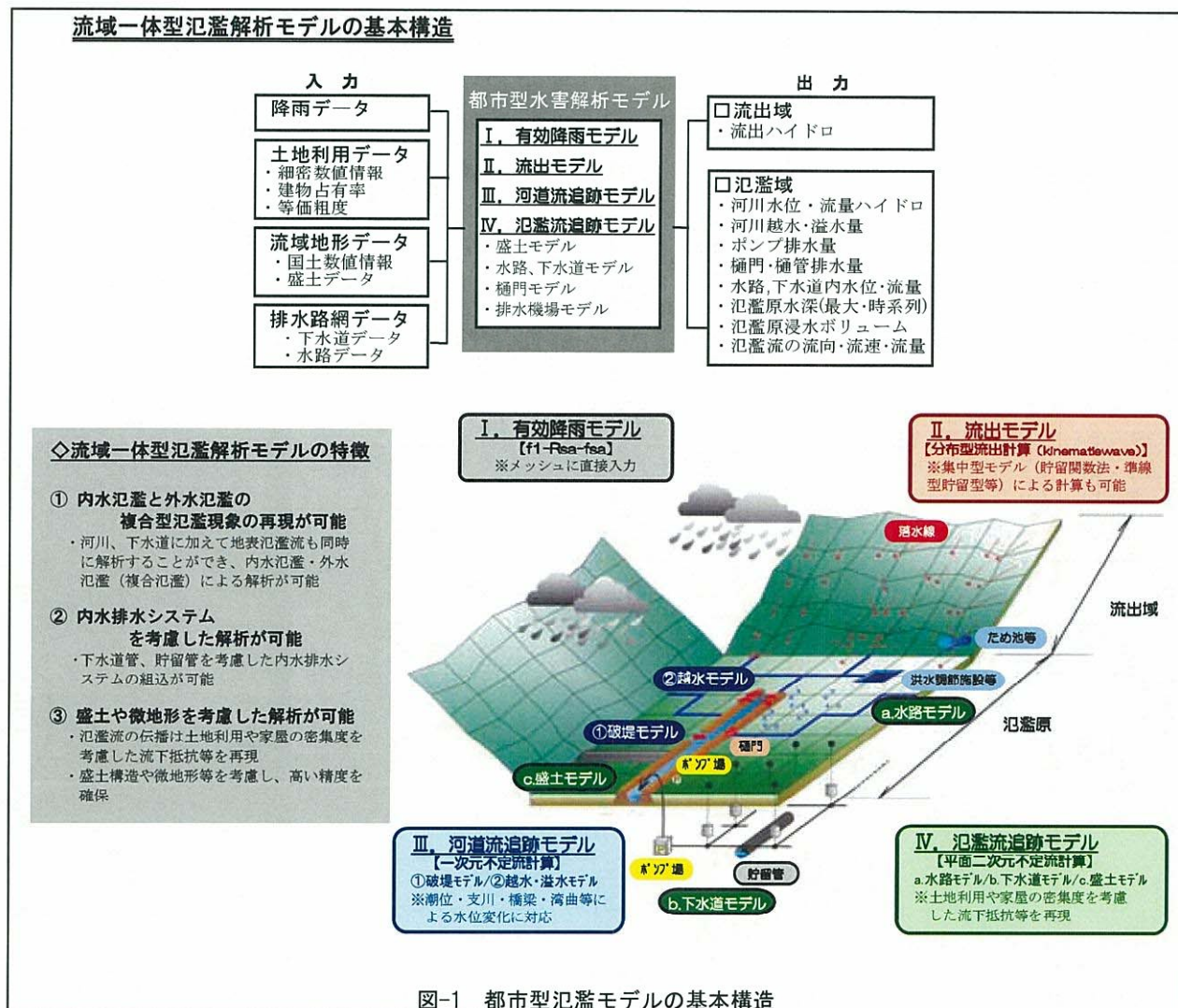


表-1 都市型氾濫モデルの概要一覧

項 目		概 要
地形	基本メッシュ	50m×50m
	地盤高	国土数値情報、氾濫原については都市計画基本図(S=1/2,500)をもとにメッシュ内平均地盤を算出
	土地利用	細密数値情報(10mメッシュ単位)を使用
解析モデル	I. 有効降雨モデル	□f1-Rsa-fsa 法(※土地利用状況による損失を反映)
	II. 流出モデル	□Kinematic wave 法 ・くぼ地、ため池、貯留施設考慮可能
	III. 河道流追跡モデル	□一次元不定流(Dynamic wave) ・河口潮位、・橋梁(橋脚・橋桁)、・河川への強制排水、・河川からの越水、溢水、破堤を考慮
	IV. 氾濫流追跡モデル	□平面二次元不定流(Dynamic wave)
	盛土(鉄道・道路)	国道・主要地方道・一般県道および鉄道(0.5m以上対象)
	水路(開水路)	水路台帳等より抽出(幅1m以上の水路対象)
	下水道(暗渠)	下水道台帳より抽出(径1m以上の下水道管対象)※擬似下水道により径1m未満の管渠も表現
	排水機場	実績排水量、もしくは吐出量-揚程曲線の反映
	樋門・樋管	内外水位差を考慮した排出計算
	貯留施設	雨水貯留管、洪水調節池を考慮

(2) 実流域における適用性の検討

1) 対象流域の概要

対象流域として、上流域に流出部(山地)を有し、下流域には市街化された氾濫原が広がる実在流域(流域面積約 120km²)を選定した。当該流域には市街地を貫流する都市河川があり、下流域には流域の約 2 割を占めるポンプ排水域が分布し、氾濫原には膨大な人口と資産が集積されている。(図-2)

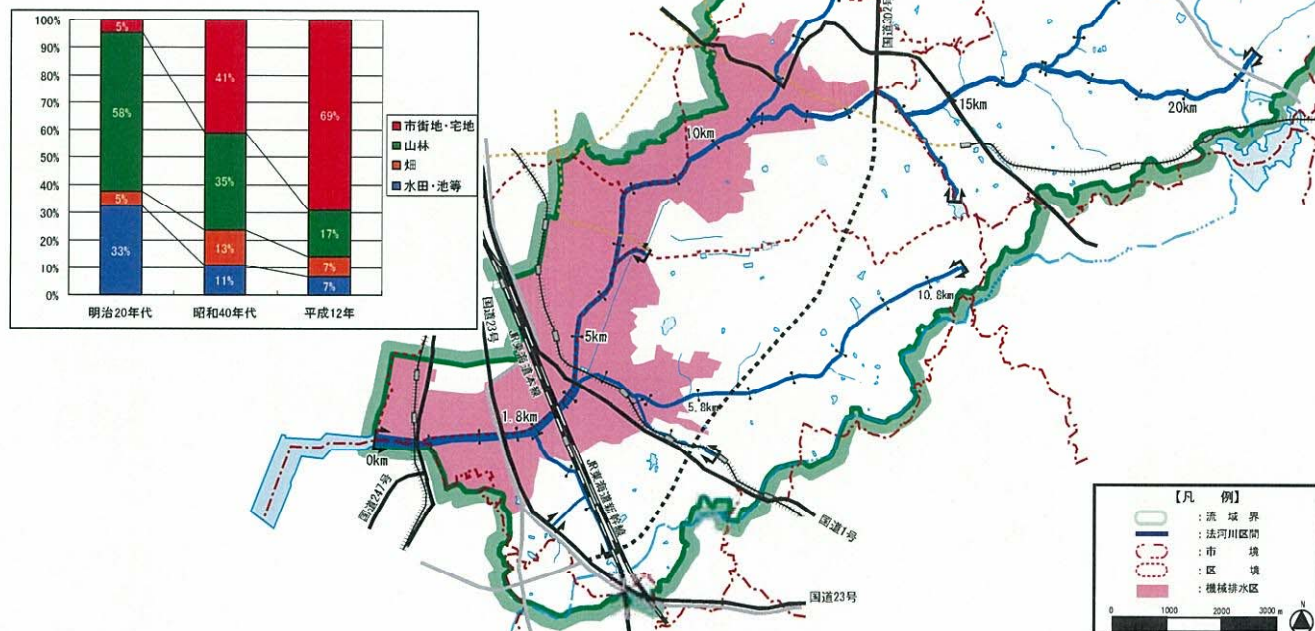


図-2 対象流域および土地利用の変遷

2) 検討概要

本モデルでは、降雨～流出～氾濫現象について広範囲な氾濫解析を目的としていることから、計算時間の軽減を図るため、都市部の下水道管渠網を幹線(φ1,000mm 以上)についてモデル化を行った。本モデルにおいて既往洪水で検証を行った場合、都市部において飛び地に浸水が残る現象が生じた(図-3)。また、下水道流末において、浸水位時系列の遅れが見られた。これらは下水道の組込み密度によるものと考えられ、また、下水道による集水効果をモデル化(表現)できていないのが要因であると思われる(図-3)。そこで、極力、計算時間の軽減を図りつつ、φ1,000mm 未満の小規模下水道のモデル化について検討した。

図-4,5 に示すように、各メッシュに擬似マンホール(排水口)を設置し、下水道区割図に従い、排水先の下水道管に直接流入(ワープ)させる。排水先の下水道管が満管になった時点、または、自メッシュにおける小規模下水道の集水能

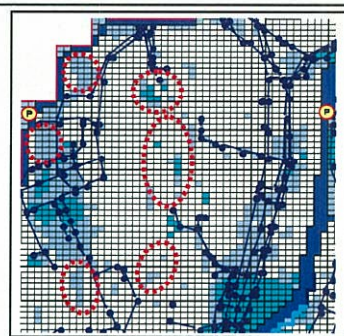


図-3 浸水状況

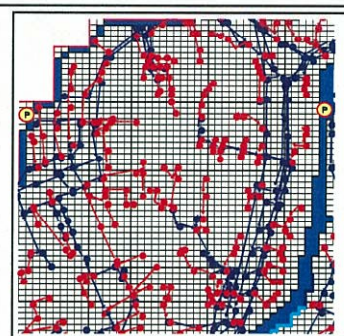


図-4 擬似下水道モデル

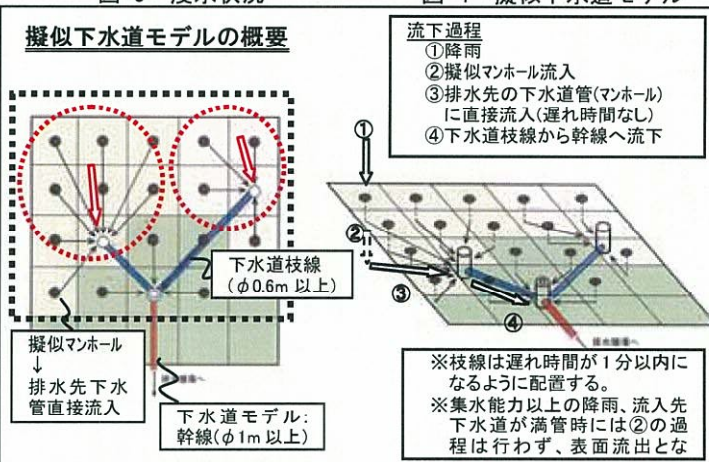


図-5 擬似下水道モデルの概要図

力を上回った時点において流入を停止し、表面流として挙動するようにした。また、遅れ時間の概念を導入した場合には計算時間の増大につながる事から、 ϕ 600mm 以上の下水道管をモデル化し、擬似下水道による遅れを 1 分以内に抑えるようにした。

3) 検討結果

対象流域には複数の河川が合流しており、各観測所における計算結果(河川水位・流量)を図-7 に示す。解析結果はピーク水位、発生時間をほぼ捉えており、他の観測所においても同様に良好な再現性が得られた。

浸水深および浸水域については実績値と計算値との平均二乗誤差 S が約 20cm 程度となり、ばらつきはあるものの氾濫状況について高い再現性が得ることができたと考えられる(図-6)。また、擬似下水道モデルによる下水道密度、集水性の向上により、飛び地での浸水状況を実現象に近い状態で捉えることができた(図-9)。浸水位の時系列変化について、課題となっていた立ち上がりの遅れも対応することができた(図-10)。

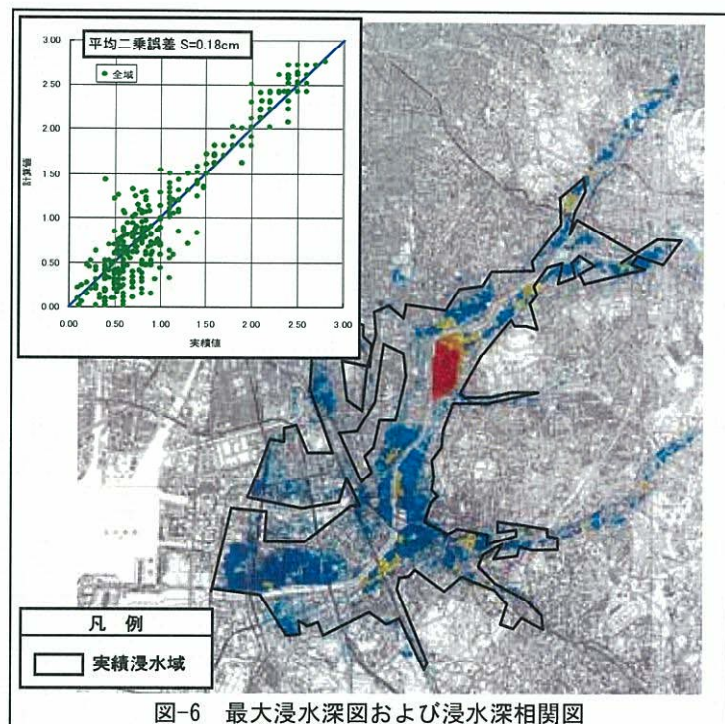


図-6 最大浸水深図および浸水深相関図

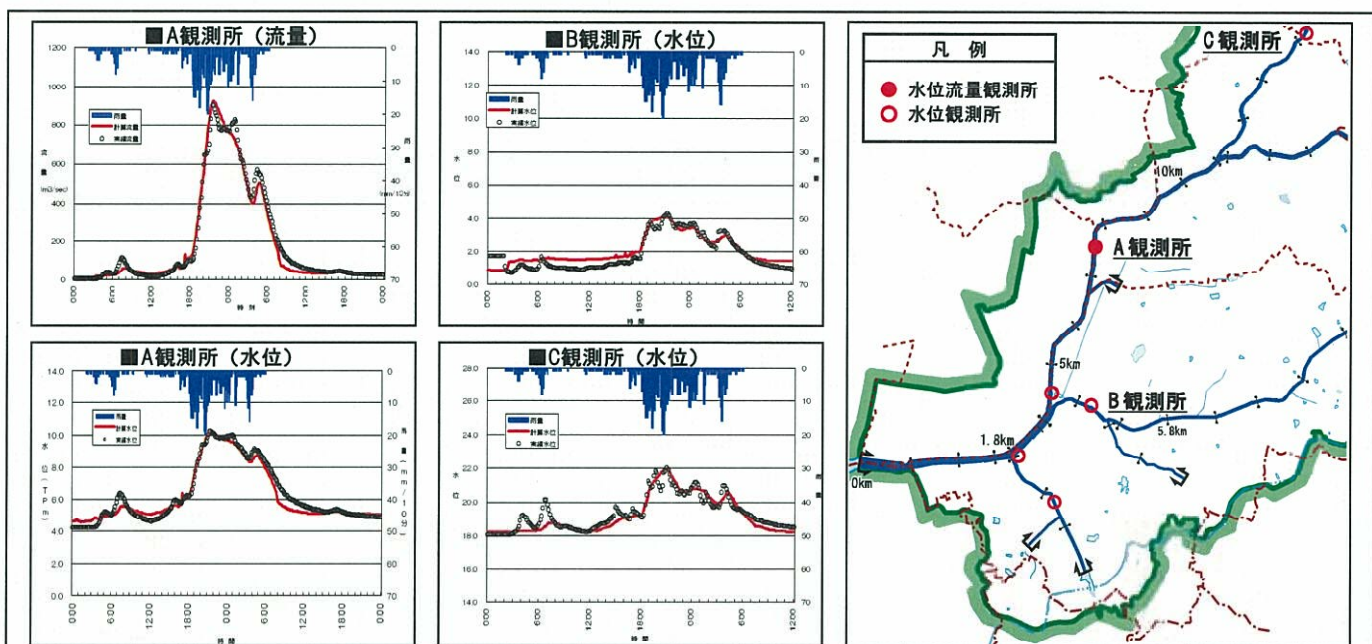


図-7 河川水位時系列変化



図-8 水文観測所位置

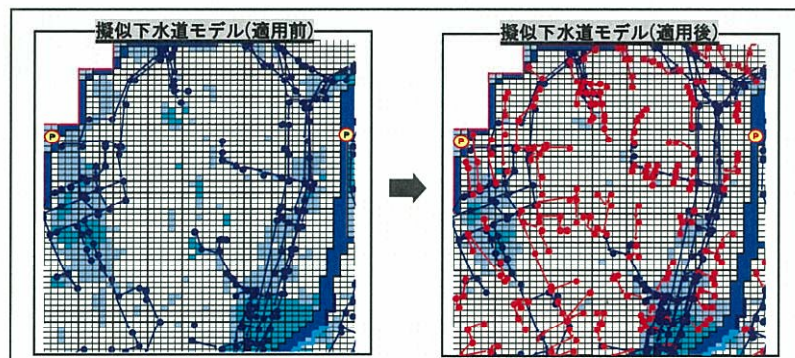


図-9 浸水状況の改善

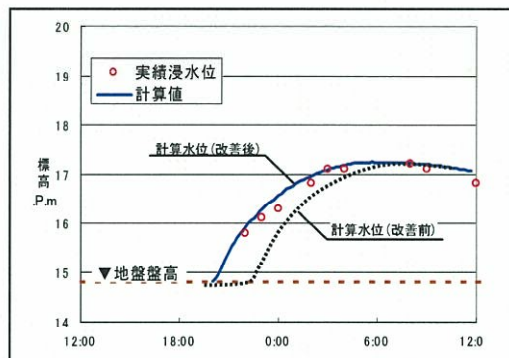


図-10 浸水位時系列変化

3. 市街地氾濫解析モデル

(1) 市街地氾濫解析モデルの概要

市街地氾濫解析モデルの基本構造の模式図および概要一覧について図-11、表-2 にそれぞれ示す。本モデルは、地表面の二次元不定流モデルを用いた氾濫解析と下水道管路の水理解析を連結した同時かつ一体的に解析可能な基本構造となっており、大きくは①全流域(メッシュ)に土地利用別の損失現象を考慮し時系列分布を直接与える『有効降雨モデル』、②有効降雨が地表面を流れて排水系等の末端にある側溝や下水

(雨水)管路への流入を追跡した『地表面流出モデル(Kinematic Wave 法)』、③下水道(マンホール)からの吹き出しや圧力流れを表現した『下水道管渠モデル(Diffusion Wave 法)』、④平地部における地形特性の他に水路・排水機場による排水路網、盛土等が与える影響下で氾濫流の伝播を追跡した『氾濫原モデル(平面二次元不定流)』からなり、降雨を与えるだけで、流出過程、氾濫過程を一体的に解析することができるモデル²⁾となっている。

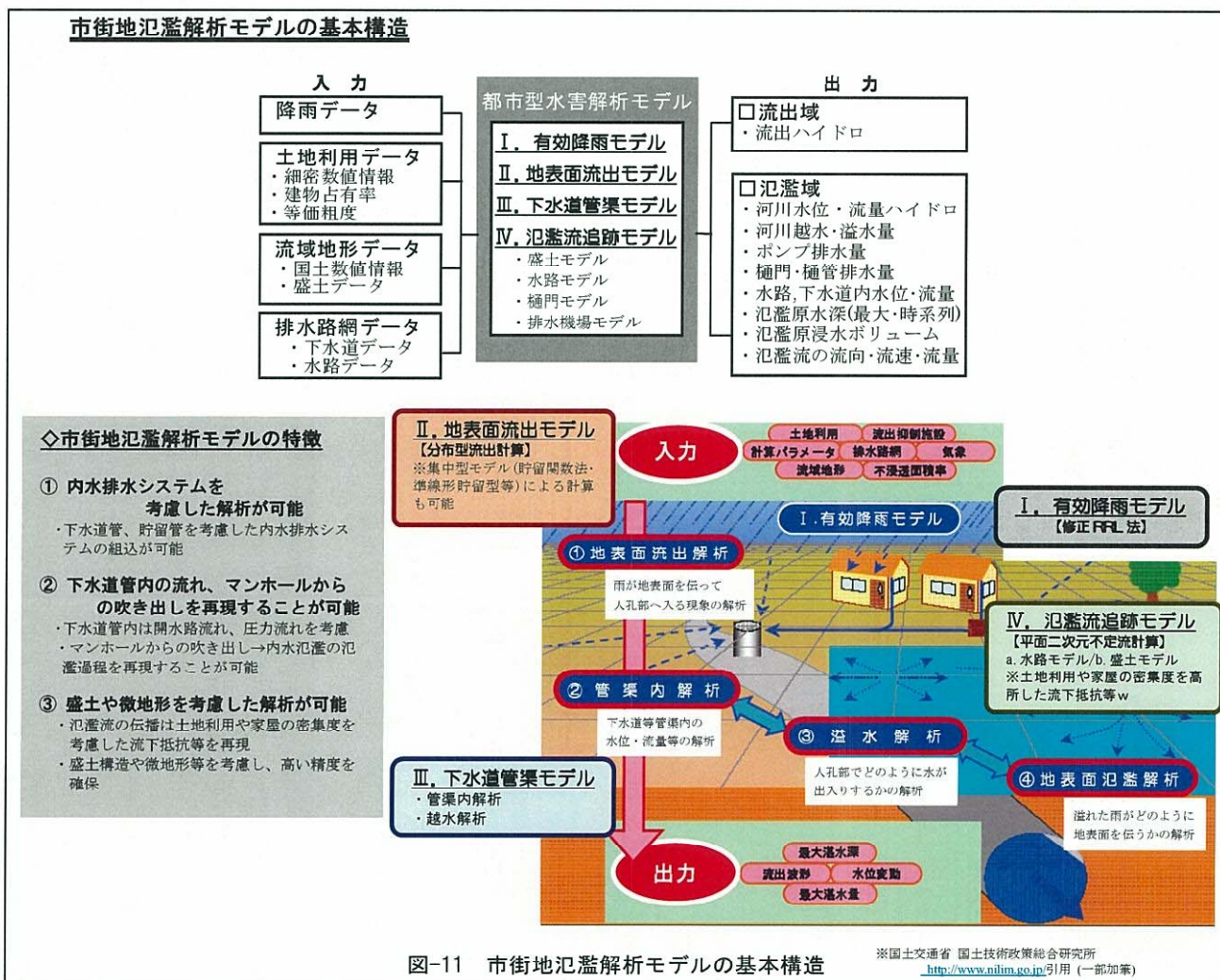


表-2 都市型氾濫モデルの概要一覧

項目	概要
地形	
基本メッシュ	50m×50m
地盤高	国土数値情報、氾濫原については都市計画基本図(S=1/2,500)をもとにメッシュ内平均地盤を算出
土地利用	細密数値情報(10mメッシュ単位)を使用
解析モデル	
I. 有効降雨モデル	□修正 RRL 法(※土地利用状況による損失を反映)
II. 地表面流出モデル	□Kinematic Wave 法
III. 下水道管渠モデル	□Diffusion Wave 法 (河口潮位、橋梁(橋脚・橋桁)、河川への強制排水、河川からの越水、溢水、破堤を考慮)
IV. 氾濫流追跡モデル	□平面二次元不定流(Dynamic wave)
盛土(鉄道・道路)	国道・主要地方道・一般県道および鉄道
水路(開水路)	水路台帳等より抽出(幅1m以上の水路対象)
その他	排水機場・樋門・樋管・貯留施設

(2) 下水道管渠モデル

1) 管渠内の水理解析

下水道管路内の流れは計画規模以下の降雨に対しては開水路流れであるが、計画規模以上の超過降雨に対しては圧力流れとなり、場合によってはマンホール等から吹き出し地表面に湛水する。したがって、本モデルによって下水道管路内の水理現象を再現するためには開水路状態、圧力流れ状態に対応できるようにする必要がある。

下水道管路内の流出計算においては、計算時間の短縮のため、運動方程式は慣性項を省略した拡散波近似式 (Diffusion wave 式)、連続式はラテラルモデル³⁾を採用して、開水路流れと圧力流れの両者の計算が可能である。

運動方程式：

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f = S_0 - \frac{n^2}{R^{4/3}} \cdot \frac{Q^2}{A^2} \quad (1)$$

連続式：

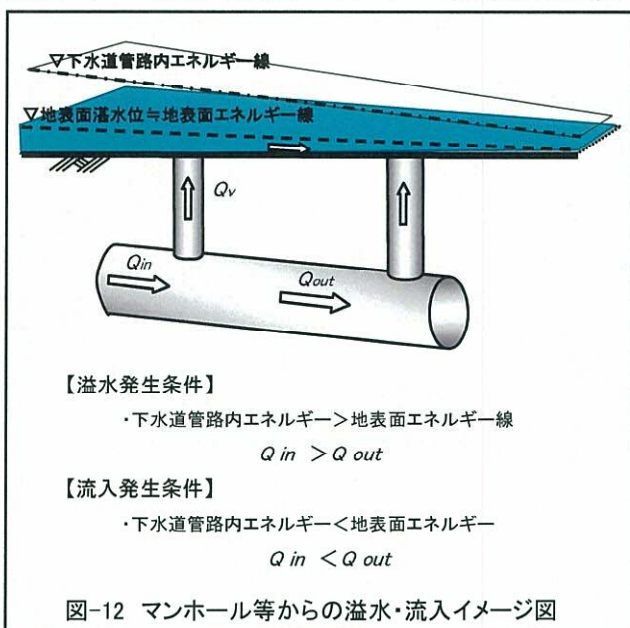
$$\text{開水路} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\text{圧力管} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{C^2 \partial u}{g \partial x} = 0 \quad (3)$$

Q : 下水道の流量	S_0 : 下水道の管路勾配
h : 下水道の動水位	S_f : 下水道の摩擦損失勾配
A : 下水道の通水断面積	x : 下水道内の流れの方向
C : 圧力波伝播速度	u : x 方向の流速
n : 下水道の粗度係数	t : 時間
R : 下水道の径深	g : 重力加速度

2) マンホール等からの溢水・流入解析 (吹き出し)

本モデルにおけるマンホール等からの溢水・流入計算においては、管路内エネルギー勾配または地表



面エネルギー勾配から下水道可能最大流量を仮定し、上流側下水道からの流入量、地表面からの流入量の収支を計算することによりマンホール等からの溢水、下水道管渠への流入計算が可能となる (図-12)。

下水道可能最大流量は、(4) 式で与え、マンホール部での連続式は (5) 式のようにになっている。

運動方程式：

$$Q_{max} = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (4)$$

連続式：

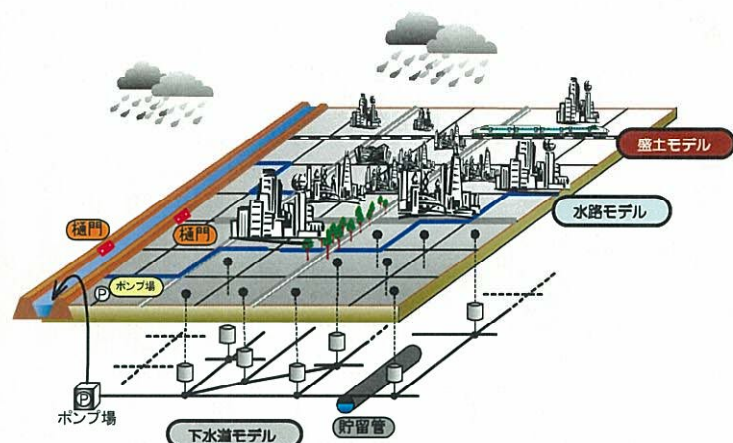
$$Q_{in} + Q_v = Q_{out} \leq Q_{max} \quad (5)$$

Q_{max}	: 下水道可能最大流量
Q_{out}	: 下水道流量
Q_{in}	: 上流側下水道及び地表面からの流入量
Q_v	: マンホール等からの溢水・流入量 (流入を正とする)
A	: 下水道の通水断面積
I	: 下水道可能最大流量算出動水勾配
n	: 下水道の粗度係数
R	: 下水道の径深
S_0	: 下水道の管路勾配
S_f	: 下水道の摩擦損失勾配

(3) 氾濫流追跡モデル

氾濫流追跡モデルはマンホール等からの溢水現象と氾濫現象を同一の場として一貫した現象として解析することが可能である。

氾濫原は前述の「流域一体型氾濫解析モデル」と同様に、メッシュ (デカルト座標系) に分割し、内水の挙動に影響を与える水路や下水道等の内水排除システム、道路等の盛土構造や微地形等を組み込むことが可能であり、平面二次元不定流により氾濫流の伝播を追跡する。また、氾濫流の面的な広がりや伝播速度は土地利用や家屋の密集度を考慮した流下抵抗等を反映している (図-13)。



4. おわりに

(1) 氾濫解析モデルの特徴

今回紹介した都市型水害に対応した氾濫解析モデルの特徴を表-3に示す。両モデルは、様々な氾濫形態（内・外水複合型氾濫）に対応でき、一連の流れで計算することができるため、河川と下水道のトータルな解析が可能であり、また、氾濫原では盛土構

造物による氾濫流の阻害、土地利用や家屋密集度を考慮した流下抵抗等を反映している。

各モデルの対象範囲は流域と都市部、下水道管渠内の水理解析は計算時間や対象範囲を考慮して、簡易的に表現したモデルや複雑な挙動（マンホール吹き出し、圧力流れ）を解析するモデル等、解析範囲や目的に応じてモデルの特徴を活かした解析ができる。

表-3 都市型氾濫モデルの概要一覧

	流域を考慮した「流域一体型氾濫解析モデル」	下水道を考慮した「市街地氾濫解析モデル」
モデルの特徴	・山間部からの雨水流出から河川流出、氾濫に至るまで、流域一体型の流出・氾濫解析が可能である。 ・降雨をメッシュに与えるだけで、一連の流れで計算することが可能である。 ・氾濫原は水路・下水道等の排水システムの組込、河道モデルと連動しており、破堤・越水等による外水氾濫や内水氾濫を解析することが可能である。 ・下水道は簡易的なモデルを採用しているため機動性が良く、下水道管網の施設配置検討等には有効である。	・都市部（特に下水道管渠）での水理解析をメインとした物理方程式に基づく流出計算モデルである。 ・氾濫原は水路・下水道等の排水システムの組込、河道モデルと連動しており、破堤・越水等による外水氾濫や内水氾濫を解析することが可能である。 ・下水道施設計画上の排水区を考慮した地表面流出計算が可能である。 ・下水道内での水理解析は管路内水位に応じて開水路流れ・圧力流れの基礎式を選択でき、複雑な水理現象を表現できる。
対象範囲	流域～都市部 ・流域から都市部まで幅広い範囲での対応が可能。	都市部（排水区） [・計算が複雑であるため計算時間が長い。 ・そのため、広範囲の解析は不向き。]
計算時間	・計算時間/実時間 約 0.1～0.2 (100km ²)	・計算時間/実時間 約1～1.5 (20km ²)
適用事例	・水災メカニズムの把握 ・浸水想定区域図の作成（洪水ハザードマップの作成支援） ・治水施設計画ツール（事業効果の把握）	・水災メカニズムの把握 ・都市浸水想定区域図の作成（内水ハザードマップの作成支援） ・下水施設計画ツール（事業効果の把握）

(2) 今後の課題

本氾濫解析モデルにおける都市部の地形表現（分割）は、モデル化を容易とするため、デカルト座標系（格子分割）を採用しているが、メッシュサイズが大きい場合には建物や街路の形状を捉えることができず、氾濫流に影響する「建物による流れの遮断」や、「道路に沿う流れの伝播」⁴⁾をうまく表現することが困難である（図-14）。そのため、複雑な地形や境界を取り込むことのできる非構造格子や、パソコンの処理能力によってはメッシュサイズを小さくすることも有効となる。今後は、は解析目的に応じて、「氾濫解析法」や「都市部の地形表現」を選ぶ、『選択型のモデル』の構築を進めていく予定である。

また、リアルタイムな避難情報（内水氾濫状況、破堤氾濫の到達時間・氾濫域）の提供を行うため、氾濫解析モデルの計算速度の高速化、様々な降雨に対する浸水状況を把握し、浸水予測の精度向上を行い、洪水予測による河川水位とリンクした『リアルタイム型の氾濫解析システム』の構築を考えている。



図-14 氾濫流に影響する都市の要素

参考文献

- 1) 土木研究所都市河川研究室：氾濫シミュレーション・マニュアル(案),土木研究所資料, 第3400号, 1996.
- 2) 山岸陽介・野仲典理・中村徹立：都市域氾濫解析モデル(NILIM)の開発, 土木技術資料 48-8, 2006.
- 3) 渡邊正弘・江藤剛治・室田明：取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算, 土木学会論文集第411号/II-12, pp.81-90, 1989.
- 4) 辻本哲朗・井上和也他：豪雨・洪水災害の減災に向けて, pp.144, 2006.
- 5) 国土技術政策総合研究所水害研究所：都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン(案), 2004.
- 6) 財団法人下水道新技術推進機構：流出解析モデル利活用マニュアル, 2006.

(2007. 10. 26 受付)