

都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法に関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON REAL-TIME FLOOD FORECASTING METHOD FOR LOCALLY HEAVY RAINFALL IN URBAN DRAINAGE AREAS

木村誠¹・城戸由能²・中北英一³

Makoto KIMURA, Yoshinobu KIDO and Eiichi NAKAKITA

¹正会員 工修 株式会社日水コン 中央研究所 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

²正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Recently, locally heavy rainfall occurs frequently at highly urbanized area, and causes serious personal accidents, so importance of flood forecasting system is growing in order to reduce damage of inundation. However, flood forecasting that secured lead-time for evacuation is extremely difficult, because the rainfall flows out rapidly.

In this study, the numerical simulation model that can finely express inundation mechanism of urban drainage areas was applied with the most recent available data and analysis tool. The influence of the factor (i.e. sewer system, overland and rainfall information) which affected inundation mechanism was evaluated through the sensibility analysis with this model, and evaluation results show some requirements of model condition and information on time and space resolution of real-time flood forecasting.

Key Words : *real-time flood forecasting, numerical simulation, locally heavy rainfall, urban area*

1. はじめに

近年, 局所的な集中豪雨 (いわゆるゲリラ豪雨) が多発し, 甚大な浸水被害や人身事故が生じるなど, その対応が課題となっている. 継続的な河川や下水道整備の進展に伴い, これら豪雨による浸水被害のリスクは以前と比べて相対的に減少しているものの, 高度に進展した地下利用や資産・交通の集中等, 都市が有する構造的問題に加え, 計画を超過する規模の豪雨が顕在化していることから甚大な浸水被害が生じるリスクは依然として高く, 早急な対応が求められている. このような計画を超過する豪雨に対して施設の対応では限界があることから, リアルタイムの浸水予測情報を用いた冠水防止活動や早期避難等の自助対策支援, いわゆるソフト対策による減災対応の必要性・重要性が高まっている. しかしながら, 特に局所豪雨に伴う都市の浸水予測は, その精度確保のために都市が有する複雑な雨水流出・浸水発生機構を数値モデルによって精細に表現し, 解析することが求められる一方で, 降雨から雨水流出・浸水発生までの時間が極めて短いという課題を有している. このため, 自助行

動に必要となるリードタイムを確保しつつ, 信頼しうる精度で都市の浸水状況を予測・発信することは極めて難しく, 現状, 面的な浸水状況のリアルタイム予測は精度的な観点からでなく, 解析時間の制約から雨水流出・浸水機構を簡略的に取り扱ったモデルの適用がなされ, 大局的な運用に限られているのが実状である¹⁾²⁾.

リアルタイム予測の視点から再現精度を保ちつつ解析速度の向上を図るためには解析手法や解析環境の向上が重要となるが, 近年, 航空レーザ測量による地形データ, 道路や下水道の施設台帳データ, 建物や道路形状のGISデータの整備や蓄積, 国内のNILIM³⁾や海外解析モデル⁴⁾等 解析ツールの高度化, パソコン等 解析・データ処理能力の向上等, 一連の解析環境の進展によって, より精細に浸水機構を表現し評価しうる環境が急速に整いつつある. ただし, 流域の大きさや流出・浸水機構の複雑さによっては解析手法や環境の高度化による対応にも限界があり, このような場合には都市の浸水解析における地表面や下水道の取り扱いが浸水再現性に及ぼす影響を十分に把握したうえで, その知見をふまえて浸水リスクの評価に影響を及ぼさない範囲で適切な簡素化を行うことが有効かつ不可欠となる. しかし, 都市の浸水機構を物

理的に表現する氾濫解析手法は、これまでの一連の研究^{3)~8)}によって概成されているものの、これら研究の大部分は被害規模の大きい外水氾濫現象の再現を主対象としており、局所集中豪雨に伴う内水氾濫現象への適用に関して得られる知見は十分でない。また、近年、内水氾濫現象の解明を目的として、より詳細に雨水流出・浸水機構を表現する手法⁶⁾⁷⁾も適用されつつあるが、これら研究もその目的から可能な限り詳細に表現・解析を行うことを主眼としたものである。このため、局所集中豪雨に伴う都市内水氾濫現象の再現性の視点から精度確保に求められる下水道や地表面の取り扱い要件について論じた事例は少なく、簡素化が再現精度に与える影響については、いまだ十分な知見が得られていない状況にある。

このような背景をふまえ、本研究では、近年多発する局所豪雨に対応した都市浸水のリアルタイム予測を行ううえで、その精度を確保しつつ解析時間の縮減を図るための条件設定に関する基礎的な要件を検討した。具体的には、都市内水域の流出・浸水機構を極力詳細に表現する氾濫解析モデルを用いて浸水解析を実施し、その解析結果を比較対象として、下水道、地表面、入力雨量情報等、流出・浸水機構の再現に係わる構成因子の取り扱いが浸水再現精度に与える影響を感度分析で評価することによって、その関係性を整理した。

2. 都市内水氾濫の解析手法

本研究では都市の雨水流出・浸水機構を極力詳細に表現する視点から、特に下水道と地表面を極力精細に表現、モデル化する方針とした。ただし、地表面や下水道の流況を解析する手法（数値モデル）はこれまでの一連の研究で概ね確立されているという認識に立ち、本研究が都市内水氾濫を再現するための要件検討を主眼とすることもふまえて、現時点で利用可能な汎用的な解析ツールの1つであるInfoWorks⁹⁾を氾濫解析手法として用いた。以下に本研究で用いた氾濫解析手法の概要を、表-1に適用手法とその代表的なパラメータの採用値を示す。

a) 下水道施設のモデル化

既往研究⁶⁾⁷⁾において、下水道の枝線管渠や分水堰の取り扱いが都市浸水の再現に影響を及ぼすことが指摘されている。これより、本研究では枝線・増強管を含む全管渠・人孔施設、並びに分水堰やポンプ施設等、全ての下水道施設を下水道台帳や竣工図を基にモデル化した。ただし、雨水・汚水枡およびその取り付け管は対象施設が極めて膨大な数となるため考慮していない。InfoWorksではこれら下水道施設内の流況解析に仮想スロットを考慮した一次元不定流モデルが適用され、開渠から圧力管状態への連続的な遷移や実施設で見られる複雑なループ状の管網流れも解析可能である。また、分水堰も越流公式とオリフィス公式の適用により、圧力状態への遷移や

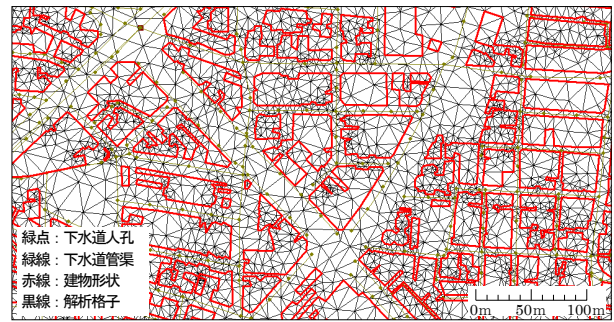


図-1 地表面の解析格子例（建物間の幅2mまでを考慮）

表-1 適用手法及びパラメータ一覧

流出過程	種別	適用手法	パラメータ	採用値
雨水流出	有効降雨	固定値	流出係数	工種別値を設定
	初期損失	固定値	損失雨量	未考慮
雨水流出	二重線形貯留法	二次元不定流	ルーティン値	流域面積に応じてソフト標準値を調整
			粗度係数 n	建物部0.3, 他0.05
地表面流れ	二次元不定流	二次元不定流	最低水深	0.001m
			粗度係数 n	塩ビ管0.010, 他0.013
下水道流れ	管渠	一次元不定流	人孔ロス	未考慮
			粗度係数 n	塩ビ管0.010, 他0.013
	分水堰	越流公式	流量係数 K	1.8 [Q=K・B・H ^{2/3}]
	ポンプ場	ポンプH-Q	H-Q関係	ポンプ諸元より設定
汚水量	原単位法	原単位法	面積原単位	計画時間最大汚水量
			面積原単位	計画時間最大汚水量
計算時間間隔			ΔT	30秒(ソフト内で可変)

逆流を考慮した分配水状況が表現できる。

b) 地表面流出過程のモデル化

既往研究⁴⁾⁵⁾において、都市域の氾濫流の挙動を再現するためには、その挙動に大きな影響を及ぼす道路や街区、建物形状の適切な表現が重要との知見が得られている。これをうけ、本研究でも航空レーザ測量データおよび土地利用GISデータを基に、非定型格子により地表面の建物等の形状を考慮して解析格子を生成した。なお、予測情報の利用用途より各戸や地下街入口等の局所的な浸水評価が求められることから、解析格子は2m以上の建物間の隙間を全て考慮（2m未満は併合）するとともに、概ね10m以下の詳細スケールで分割・生成した（図-1）。

ここで、既往研究では家屋等の建物が氾濫流に与える影響を評価する視点から、建物敷地部を非透水域と扱っている例が大部分を占める。しかし、実際には木造家屋は敷地部に氾濫水が流入し、コンクリート構造物であっても止水対策を行わなければ同様である。河川外水氾濫と比して都市内水氾濫は氾濫水量が比較的小さく、相対的に建物部の冠水の影響が大きくなると考えられることから、本研究では建物敷地部を一律透水域とみなし、既往研究³⁾を参考に粗度係数を道路・街区部0.05、建物部0.32と設定した。InfoWorksではこれら地表面の氾濫流の解析に浅水流方程式を基礎式とするTVD法を用いた2次精度の二次元不定流モデルが適用される。数値展開の詳細については紙面の都合上、参考文献¹⁰⁾を参照されたい。

c) 地表-下水道間の水移動のモデル化

都市の氾濫解析においては地表面からの雨水の流入や下水道からの溢水を適切に取り扱う必要があり、一部の既往研究⁸⁾では雨水枡や道路側溝等を考慮した詳細な解析も試みられている。ただし、本研究では末端管渠を含

む全ての管渠・人孔を対象としており、評価スケールに対して十分密に人孔が配置される（概ね管渠延長25mに1個）と考えることから、多くの既往研究と同様、人孔を介して水の移動が行われると想定した。InfoWorksでは堰公式により地表と下水道間の水の移動が表現される。

3. 実流域への適用および構成因子の影響評価

(1) 詳細氾濫解析モデルの構築および適用

本研究では土地利用や下水道整備等、都市化が高度に進化した地区として大阪市のA処理区上流域 475haを対象とした(図-2)。本地区は雨水の全てが合流式下水道で収集・排除され、分水堰を介して既設管から増強幹線に分配水される複雑な排水形態を有している。本地区を対象に2. で示した手法で構築した詳細氾濫解析モデルの妥当性を検証するため、浸水発生時の降雨を入力条件として下水道内の流況や地表面の浸水状況を解析し、実績値と比較した。なお、一般に、浸水実績は被害届や聞き取り調査に基づいておおよその区域が整理されたものであり、道路冠水や床下・床上等の区分に応じた局所的な浸水の再現性を詳細に比較・評価することは困難である。しかし、解析による床上浸水箇所のほとんど全てが実績浸水箇所で見られ、かつ解析格子での浸水有無も高い的中率を示す等、概ね実績浸水箇所の分布傾向が再現できることを確認した。また、図-3に示すように下水道内の流況再現性も良好であることから構築した詳細モデルの再現精度は十分であると判断し、以降の検討に適用した。

(2) 影響評価ケース

(1) で作成した詳細氾濫解析モデルで得られる結果を比較対象とする基準ケースとし、流出・浸水過程に係わる各モデル構成因子が、都市内水氾濫の再現精度や解析負荷に与える影響を感度分析によって評価した。以下に評価ケースの設定内容を示す。

a) 下水道施設の取り扱い

現在、一般的な計画検討においては作業効率の観点からφ500程度の準幹線以上の管渠を解析対象とすることが多い。対象エリアではφ500以下の管渠を対象外にできれば、解析管渠延長を約3割に縮減することが可能となる(図-4a)。くわえて末端管渠に多く見られ、解析の安定性に係わるループ状管網の形成箇所も削減できるため、解析負荷の低減に対して極めて有効な手段となる。これをふまえ、対象管渠の管径ランクを考慮して表-2に示すケースを設定した。なお、管渠の簡素化手法としては、施設容量の整合を図る視点から、解析の対象外とする管渠・人孔容量を流下先の対象人孔に付加する手法(ランピング¹¹⁾)が基本となる。ただし、実検討では省力化のために対象とする管渠のみを抽出しモデル化することも多いため、対象外管渠を単純に省略するケースも評

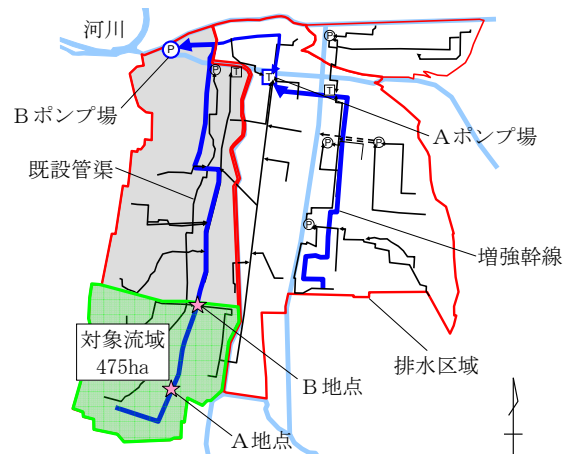
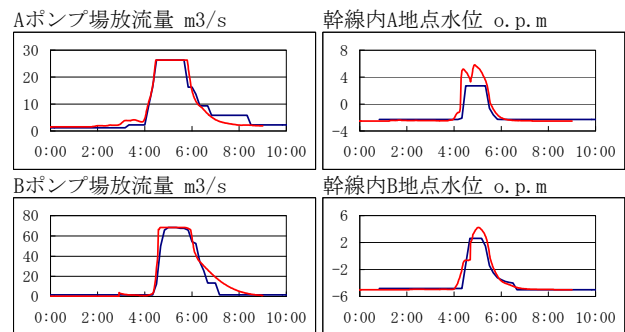


図-2 検討対象流域



※実績水位のピーク部は水位計の計測可能値を超過し頭打ちとなっている
図-3 実績浸水の再現結果 (ポンプ吐出量、幹線内水位)

価の対象とした。一方、既設管と増補管を接続する分水堰については、堰構造の取り扱いが浸水の再現性に影響を及ぼすとの指摘がなされている⁷⁾。よって、本研究でも堰諸元に基づき越流公式によって分水量を求めるケースに対して、表-3に示すように、分水堰の規模(接続管の管径ランク)に応じて分水堰を介さずに単純に接続する(堰設置部の人孔を共通化する)ケースを設定した。

b) 地表面流出過程の取り扱い

内水氾濫においては氾濫流の流速や流量が小さいため、特に建物を透水域として取り扱う場合には、建物等の形状を厳密に考慮して格子を分割する必要性は相対的に小さいと考えられる。また、解析格子の精細さが雨水流出や浸水の再現性に影響を及ぼすと想定されるが、一方で解析格子を大きく取ることができれば、解析容量や解析の安定性の点から解析負荷の低減に対して有効な手段となる。よって、建物形状の取り扱いの簡素化ケースとして道路等の建物間の隙間の扱いに応じたケース(図-4b)に加え、建物・道路の形状を考慮せず定型の解析格子を用いる場合(図-4c)も想定して、格子の大きさに応じたケース設定を行った(表-4)。なお、建物等の形状を考慮せず定型格子を用いるケースでは、各解析格子内の建物や道路の面積率に応じた等価粗度³⁾を用いて格子内の建物による流下障害の影響を表現するものとした。

c) 入力雨量情報の取り扱い

局所集中豪雨に対するリアルタイムの浸水予測を想定する場合、解析に用いる入力雨量情報の空間分解能や時

表-2 下水道(1) 対象管渠の評価ケース

設定概要	ケース名	延長		管渠数		
		m	比率%	本	比率%	
全管渠対象	case0	153,318	100	6,094	100	
枝線>	> φ 300	1-1, 2a	71,846	47	2,330	38
準幹線>	> φ 500	1-1, 2b	41,626	27	1,139	19
幹線>	> φ 900	1-1, 2c	21,995	14	479	8

※case1-1はランピング処理なし, case1-2は処理あり

表-3 下水道(2) 分水堰の評価ケース

設定概要	ケース名	分水堰数		
		箇所	比率%	
全分水堰構造考慮	case0	82	100	
枝線>	> φ 300	1-3a	56	68
準幹線>	> φ 500	1-3b	38	46
幹線>	> φ 900	1-3c	22	27
全堰構造未考慮	1-3d	0	0	

表-4 地表面 解析格子分割の評価ケース

設定概要	ケース名	建物諸元		解析メッシュ数	平均面積m ²	
		建物数	頂点数			
建物形状考慮	> 幅2m	case0	2,449	40,160	201,188	24
	> 幅3m	2-1a	1,761	35,135	169,803	28
	> 幅4m	2-1b	1,303	29,900	142,908	33
	> 幅5m	2-1c	968	25,427	125,070	38
建物形状未考慮	5m格子	2-2a			184,813	26
	10m "	2-2b			46,406	102
	25m "	2-2c			7,595	626
	50m "	2-2d			2,193	2,167

表-5 入力雨量情報の評価ケース

空間分解能			時間分解能				
設定概要 (配置間隔)	ケース名	流域平均雨量比%	設定概要 (平均範囲)	ケース名	流域平均雨量比%		
地点雨量	case0	100	地点雨量	case0	100		
点雨量	250m	3-1a	100	面雨量	250m	3-2a	100
	500m	3-1b	100		500m	3-2b	99
地上雨量計	1km	3-1c	99	レーダ雨量計	1km	3-2c	98
	2km	3-1d	102		2km	3-2d	97
	3km	3-1e	88		3km	3-2e	85
設定概要	ケース名	最大強度 mm/hr	設定概要	ケース名	最大強度 mm/hr		
5分雨量	case0	139	5分雨量	case0	139		
積算雨量	10分配信	3-3a	110	平均雨量	10分平均	3-4a	129
	20分配信	3-3b	103		20分平均	3-4b	103
	30分配信	3-3c	67		30分平均	3-4c	88
	60分配信	3-3d	65		60分平均	3-4d	65

空間分解能が浸水再現性に影響を及ぼすことが想定される。よって、入力情報として降雨観測や予測に求められる要件のうち、空間分解能としては地上雨量計の配置間隔およびレーダ雨量計の空間平均を行うメッシュサイズを、時間分解能としては配信間隔および時間平均を行う時間長を対象として、その適用方法による影響を評価・把握する視点から表-5に示すケースを設定した。

d) 検討対象降雨および評価指標

局所集中豪雨時の浸水に対する影響を評価するため、各構成因子の評価に際して空間的・時間的に集中した特性を有する降雨を対象とした。本報では一例として、降雨中心より同心円状に低減するとして空間分布特性(実績豪雨より平均的なDA特性を設定)を持つ中央集中波形(30年確率降雨, 5分間隔雨量)の降雨が、対象流域の中心に移動なく生起する場合を想定した結果を示す。

また、評価指標は浸水リスク評価の観点から表-6の指標を採用した。ただし、本来、モデルの利用目的によって重視される指標や要求される精度は異なるものである。

a) 下水道: 対象管渠の絞込み

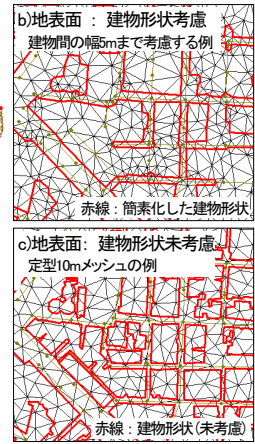


図-4 簡素化のイメージ(下水道および地表面)

表-6 影響評価指標

	項目	内容	算定方法
①	浸水量	最大浸水深発生時の区域内集計値	基準ケースに対する誤差率(%) =(各ケース値-基準ケース値) /基準ケース値×100
②	総浸水面積		
③	床上		
④	最大浸水深	最大浸水深発生時の区域内最大値	
⑤	最大浸水深	基準ケースに対する生起時刻差	時刻差(min)=各ケースの時刻-基準ケースの時刻

このため、本研究では利用用途に応じた適切な取り扱いを行うための基礎的な情報整理を目的として簡素化と精度の関係性を明らかにすることに重点をおき、精度評価は相対的な比較に留めるものとした。本指標が大きく負値となる場合には簡素化によって浸水が過小に評価されたこととなり、予測運用に対して不適と判断される。

(3) 影響評価結果および考察

図-5, 6に各ケースの評価結果を示す。本結果より確認された各構成因子の影響を以下に整理する。

a) 下水道施設の取り扱いの影響(図-6a)

人孔部で地表面と下水道間の水の移動を表現していることから、人孔の省略によって溢水箇所が残された評価対象人孔に移動・集中し、床上浸水面積や浸水深等の被害規模が大きくなる。ただし、簡素化によって総じて安全側の結果が得られており、枝線~準幹線以上を対象とした解析(図-6aの赤色枠)で全管渠による解析と概ね同等の精度で浸水リスクが評価可能と判断できる。なお、今回の検討では浸水が過小に評価される地点はなかったものの、簡素化に伴う浸水箇所の移動が地下街入口やアンダーパス等、特定地点のリスク評価に際して懸案となることも想定される。このような場合には当該箇所付近の詳細なモデル化や既往研究⁷⁾のように残された評価対象人孔と地表面の関連付けを行う等の工夫が必要となる。

一方、簡素化の方法による影響をみると、ランピング処理を行わず単純に管渠を省略する場合、省略分の管渠や施設の容量が考慮されないために浸水被害規模がさらに大きくなる。浸水予測の信頼性という観点から過度の過大評価は望ましくないため、浸水再現性の確保に際して適切なランピング処理を行う重要性が指摘できる。

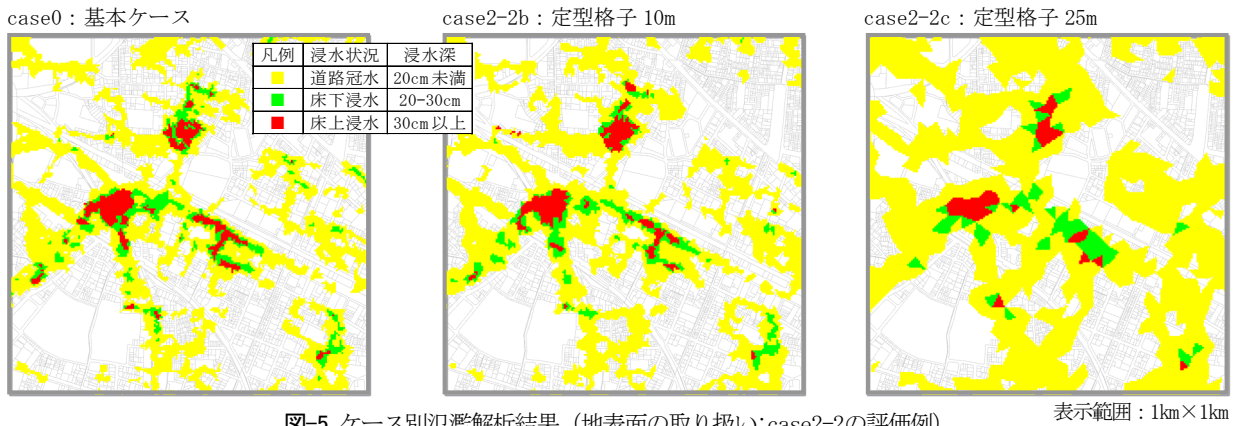
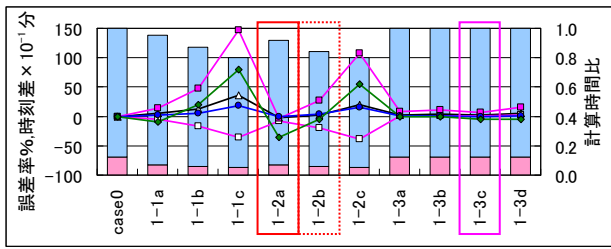


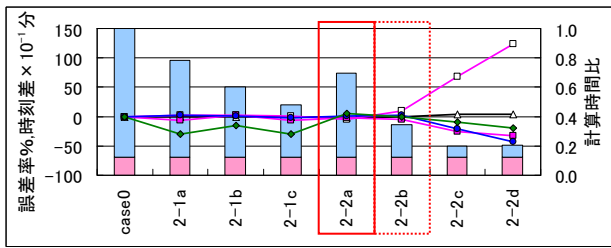
図-5 ケース別氾濫解析結果（地表面の取り扱い: case2-2の評価例）

表示範囲: 1km×1km

a) 下水道施設関連 (case1)

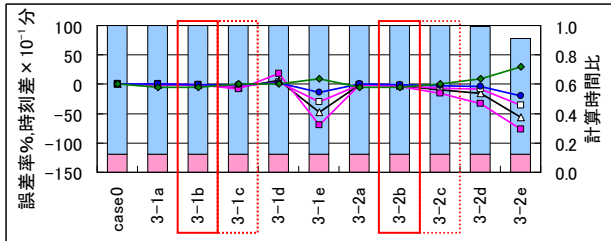


b) 地表面流出経路関連 (case2)



c) 入力雨量情報関連 (case3)

空間分解能



時間分解能

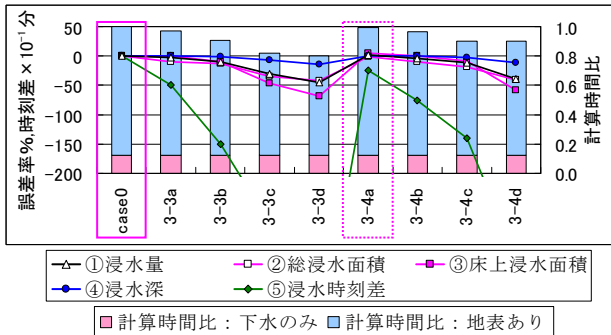


図-6 基準ケースに対する各評価ケースの感度分析結果

なお、分水堰の取り扱いが浸水状況に及ぼす影響は相対的に小さく、幹線管渠に接続する分水堰の取り扱いにのみ留意すれば(図-6aの桃色枠), リスク評価上は十分

表-7 モデル構成因子の組み合わせによる簡素化ケース

ケース名	設定概要		
	下水道管渠	分水堰	地表面
詳細	全管渠対象	全堰構造考慮	非定型幅2m考慮
簡素化	4-1a 枝線以上	幹線以上考慮	定型5mメッシュ
ケース	4-1b 枝線以上	〃	定型10mメッシュ
	4-2a 準幹線以上	〃	定型5mメッシュ
	4-2b 準幹線以上	〃	定型10mメッシュ

①浸水量 ②総浸水面積 ③床上浸水面積
④浸水深 ⑤浸水時刻差

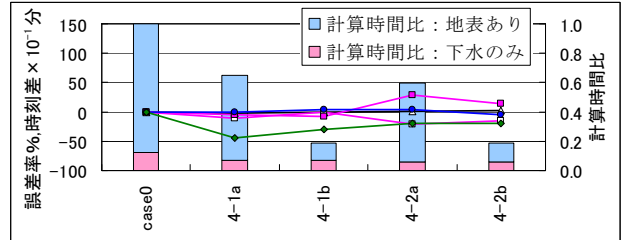


図-7 構成因子の組み合わせ簡素化ケースの感度分析結果

な再現精度を確保できることが確認された。

b) 地表面流出過程の取り扱いの影響(図-5, 図-6b)

平面的な流動が比較的小さい都市内水氾濫の再現に際しては、建物形状の取り扱い方法や非定型格子と定型格子の違いによる影響は相対的に小さく、非定型格子によって建物や道路を明確に区分する必要が小さいことが確認された。一方、解析格子サイズが大きくなるほど浸水深が浅く、広域的に広がる傾向となる(図-5)。本結果より、精度の良い浸水リスク評価のためには5~10mメッシュ程度の空間密度(図-6bの赤色枠)で解析格子を分割・生成する必要があると判断できる。

c) 入力雨量情報の取り扱いの影響(図-6c)

入力雨量情報を取得する点的雨量計の空間的な配置間隔やレーダ雨量計の平均化処理の範囲が粗くなると浸水が過小に評価され、リスク評価上 危険側の結果となることが確認された。これより、点雨量、面雨量ともに500~1000m平方以下の空間分解能(図-6cの赤色枠)が必要と判断できる。一方、時間分解能の影響は、降雨観測や予測の配信間隔や平均化処理の間隔が長くなると、その時間に応じて浸水発生時刻が直接的に遅れることが確認された。これより、少しでも早期の発信が必要となる都市内水氾濫予測への適用に際しては、極力短時間での雨量配信・更新(図-6cの桃色枠)が必要と判断できる。

case0 : 基本ケース

case4-1a : 枝線管渠, 5m 格子

case4-2b : 準幹線管渠, 10m 格子

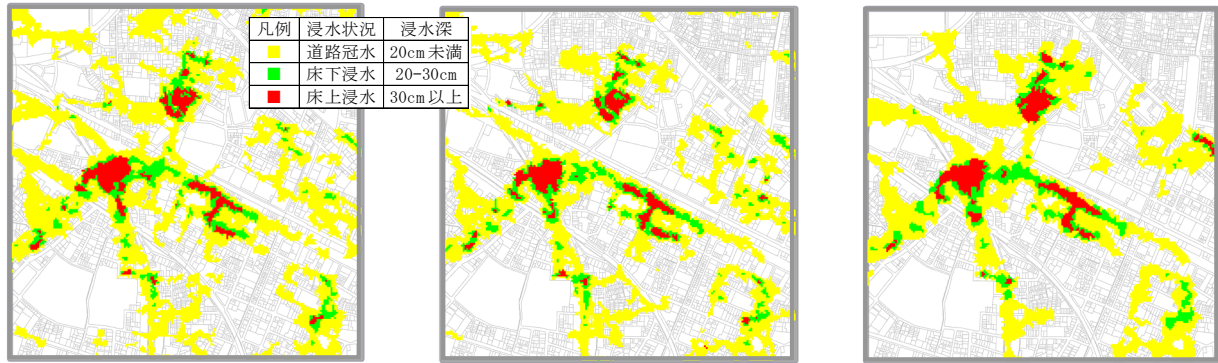


図-8 簡素化による影響の評価結果 (簡素化ケース4-1a, 4-2bの例)

表示範囲: 1km×1km

(4) 構成因子の組み合わせによる簡素化の影響確認

以上の知見をふまえ、簡素化ケースとして対象管渠をランピング処理した枝線および準幹線とし、地表面の解析格子を定型5mおよび10mメッシュとした場合(表-7)の評価結果を図-7, 8に示す。この結果から下水道施設及び地表面の取り扱いの簡素化を行った場合でも概ね詳細モデルと同程度の再現精度が確保できており、浸水再現精度を確保しつつ、計算時間で代表される解析負荷を2割程度まで縮減できる可能性があることが示唆された。

4. おわりに

本研究では都市内水域の流出・浸水機構を詳細に表現する氾濫解析モデルを用いた浸水解析を実施し、局所集中豪雨に対応した都市内水氾濫のリアルタイム予測を行う上で浸水現象の精度確保に求められるモデル化の要件を検討した。その結果、都市内水氾濫の再現に際しては「下水道・地表面の解像度」と「入力雨量情報の空間・時間分解能」の影響が大きいことが確認された。

- 下水道管渠は枝線→準幹線程度の精細さが必要である。また、解析対象外管渠の省略に際しては適切なランピング処理を行う必要がある。
- 地表面は5～10mメッシュ程度の精細さが必要である。一方、この程度の精細さを有すれば、解析格子により建物や道路を厳密に表現する必要性は小さい。
- 入力雨量情報としては、500～1000m程度の空間分解能と、極力短時間での更新・配信が必要である。

本報では、紙面の都合により一流域一降雨における結果を示したが、成果の一般化を図るため、引き続き特性の異なる流域や降雨による検証を進めているところである。また、本報では利用用途に応じて要求される精度が異なることから、浸水規模を指標とした相対的な精度評価を行うにとどめたが、今後は流出・浸水過程の表現の違いに伴う浸水再現性の劣化や向上の影響を避難や自助支援等、予測情報の利用効果の観点から定量的に評価し、予測手法の最適化を進めていく考えである。

謝辞: 本研究に際し、大阪市建設局下水道河川部より施設データの提供を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田士郎, 宮崎誠, 谷岡康, 飯田進史 他: リアルタイム浸水情報提供システムの構築と運用—信濃川下流低内水地域を対象として—, 河川技術論文集, 第11巻, pp193-198, 2005.
- 2) 中根和朗, 松浦玲子, 藤原直樹, 笹山隆: 都市域における豪雨時簡易浸水予測および危険度評価方法に関する検討, 河川技術論文集, 第11巻, pp59-64, 2004.
- 3) 栗城稔, 末次忠司, 海野仁, 田中義人, 小林弘明: 氾濫シミュレーションマニュアル(案)—シミュレーションの手引き及び新モデルの検証—, 土木研究所資料第, 第3400号, 1996.
- 4) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No.600/II-27, pp.23-35, 1998.
- 5) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一 他: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10, 2002.
- 6) 相良亮輔, 錦織俊之, 井上和也, 戸田圭一: 枝線下水道を考慮した市街地氾濫解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.589-594, 2004.
- 7) 武田誠, 山中威士, 霧生元道, 松尾直規: 都市内水氾濫解析における複雑な下水道管網のモデル化に関する検討, 河川技術論文集, 第15巻, pp393-398, 2009.
- 8) 関根正人, 青野雅士, 風間大彰: 雑司ヶ谷幹線下水道における水難事故に関する数値解析, 水工学論文集, 第54巻, pp.901-906, 2010.
- 9) 中村徹立, 佐々木淑充, 水草浩一: 都市氾濫解析モデル活用ガイドライン(案)—都市浸水—, 国土技術政策総合研究所資料, 第202号, 2004.
- 10) Alcrudo, F., et al. ; A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 16, pp.489-505, 1993.
- 11) 渡辺政広, 栗原崇 他: 都市下水道管渠システムの浸水はんらん解析におけるマンホールの水理学的役割とそのランピング手法, 水工学論文集, 第40巻, pp.661-668, 1996.

(2010. 9. 30受付)