

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の簡素化

SIMPLIFICATION METHOD ON REAL-TIME FLOOD FORECASTING 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 order to develop a real-time flood forecasting method for locally heavy rainfalls in urban drainage areas, we have developed flood forecasting models with two types of simplified overland surface and have evaluated these models through case studies in an actual basin. As a result, we confirmed that the simplified models had enough flood prediction accuracies in practical use. Furthermore, the computational time decreased by applying simplified models; therefore, the effectiveness of proposed simplifying flood forecasting model was indicated.

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

1. はじめに

近年, 局地的な集中豪雨 (いわゆるゲリラ豪雨) が多発し, 深刻な事故が生じるなど, その対応が課題となっている. また, 都市内水域では高度な地下利用が行われており, 人命救護の観点からリアルタイム浸水予測情報を用いた冠水防止活動や早期避難等, 自助対策支援の必要性・重要性が高まっている. しかしながら, 特に局地的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, 減災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困難であり, 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, 計算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が適用されているのが実状である¹⁾.

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, 流域の大きさや流出・浸水機構の複雑さによっては限界がある. 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, 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^{2)~9)}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, 局地的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, より詳細に雨水流出・浸水機構を表現する手法^{5)~9)}も適用されつつあるが, これらも可能な限り詳細に氾濫現象を表現・解析することを主点としたものである. このため, 局地的豪雨に伴う都市内水氾濫現象のリアルタイム予測の視点から, その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, モデル化の方法や解析手法の簡素化が浸水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.

これを念頭におき, 筆者らは既往研究¹⁰⁾において, 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評

価し、浸水リスクの評価に影響を及ぼさない下水道や地表面の簡素化の範囲を確認した。ただし、その結果、地表面は25㎡程度（5m矩形格子相当）の精細なスケールで格子分割を行う必要があり、このレベルの簡素化では地表面の氾濫解析に要する計算負荷をさほど低減できないことを確認した。これを受けて本報では、リアルタイム浸水予測における計算速度のさらなる向上を図る観点から、さらに簡素化が求められる地表面氾濫解析を対象として簡素化方策を抽出し、その適用性を検証した。

2. 既往研究で構築した氾濫解析手法¹⁰⁾

著者らは浸水再現精度と計算負荷の両立が可能となる都市域を対象としたリアルタイム浸水予測を実現するため、都市の雨水流出・浸水機構に係る下水道と地表面を極力精細に表現・評価することを基本としつつ、浸水再現性に影響を及ぼさない範囲で簡素化の可能性を模索する方針としている。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成し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点としていることもふまえて、現時点で利用可能な汎用的な解析ツールの1つであるInfoWorks¹¹⁾を用いた。以下に既往研究¹⁰⁾で構築した詳細氾濫解析モデルとその簡素化モデルの概要を示す。

a) 詳細氾濫解析モデル（詳細モデル）

本モデルは下水道内の流れに一次元不定流モデルを、地表面流れに二次元不定流モデルを適用し、極力詳細にモデル化した。まず、下水道は雨水・污水井とその取り付け管を除く、全管渠・人孔施設、並びに分水堰やポンプ施設等、全ての施設を下水道台帳や竣工図を基にモデル化した（図-1a）。次に地表面は航空レーザ測量データおよび土地利用GISデータより、地表面の建物形状を考慮して一定の大きさでない格子（非定型格子）により解析格子を生成した。具体的には各戸や地下街入口等の局所的な浸水評価を行うため、建物間の2m以上の隙間を全て考慮（2m未満は併合）するとともに、最大格子面積を400㎡として分割・生成した（図-1b）。なお建物が氾濫流に及ぼす影響は、敷地部を一律透水域と扱い、高い粗度係数を設定することで表現した。最後に地表と下水道間の水の移動は、末端管渠までを評価対象としており十分密に人孔が配置されることから、人孔を介して水の移動が行われると想定し、分水堰によってモデル化した。

なお、本モデルは実流域に適用し、下水道内の流況や浸水状況が良好に再現できることを確認した¹⁰⁾。これをふまえ、本研究では詳細モデルによって得られる結果を比較対象とする基準ケースとして、解析モデルあるいは手法の簡素化が都市内水氾濫の再現精度や計算負荷に与える影響を評価するものとした。表-1に実績再現によって決定した代表的なパラメータの採用値を示す。

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	ルーティング値	流域面積に応じてソフト標準値を調整 1~4
地表面流れ	地表面	二次元不定流	粗度係数 n	建物部0.3, 他0.05
			定型格子は建物面積率の等価粗度 ²⁾ を設定	
下水道流れ	管渠	一次元不定流	最低水深	0.001m
			粗度係数 n	塩ビ管0.010, 他0.013
	分水堰	越流公式	人孔ロス	未考慮
			流量係数 K	1.8 [$Q=K \cdot B \cdot H^{2/3}$]
	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	面積原単位	計画時間最大汚水量



図-1 詳細モデルと簡素化モデル

b) 簡素化した氾濫解析モデル（簡素化モデル）

既往研究¹⁰⁾において、筆者らは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評価した。その結果、下水道についてはφ300以下の末端管渠を対象外としても浸水再現性が悪化しないことを確認した。φ300超過管渠のみを対象とすることで、管渠数は詳細モデルの38%に大きく縮減される。一方、地表面については、都市内水氾濫の再現において建物形状を考慮する必要性は小さく、解析格子を一定の大きさの格子（定型格子）としても十分な精度が得られることを確認した。ただし、その際には25㎡程度の精細な格子分割が必要となり、格子数の低減は92%に留まる。このため、選定された簡素化モデル（下水道φ300超過、地表面25㎡格子）の計算負荷も詳細モデルの60%に低減に留まった。このように、リアルタイム浸水予測の観点から、特に地表面氾濫解析のさらなる簡素化の必要性が示唆された。

3. 本研究で適用する簡素化手法

地表面氾濫解析の計算負荷を軽減する方策は、地表面

の解析格子を大きく、粗くすることが基本となる。解析格子を大きくできれば、計算対象となる解析格子数の縮減に加えて計算時間間隔の拡大も可能となり、計算負荷の低減に大きく寄与する。しかしながら、既往研究¹⁰⁾の感度分析結果に示されたように、単純に解析格子を大きくすると、浸水が面的に平準化され浸水深が小さく評価されるため、浸水リスクの評価においては懸案となる。よって、本研究では、浸水再現性を確保しつつ、より大きな解析格子で計算する手法を検討する。

既往研究^{12), 13)}では二次元不定流解析の計算負荷を軽減する方策として、解析格子内の詳細地形を考慮して粗い解析格子で二次元不定流解析を行う手法を、各々「h-VA 汎解析手法」¹²⁾、「Multi-Cell overland solver」¹³⁾として提案し、実流域への適用を通して、その有効性を検証している。これらは二次元不定流解析の解析格子の1つ1つを、詳細地形を考慮した池とみなして連続式を解く手法であり、解析によって得られる浸水位を格子内一定とし、これより詳細地形の地盤高を差し引くことで詳細な浸水深を得る手法である。

本研究では、これらの手法を参考に、さらに簡略的に地表面汎解析現象を取り扱う手法として「詳細地形を考慮した二次元不定流解析モデル」と「二次元開水路ポンドモデル」を対象として、その適用性を検証する。以下、本研究で対象とする手法について述べる。

a) 詳細地形を考慮した二次元不定流解析モデル

河川の外水汎解析に関する洪水ハザードマップの作成では、広大なエリアの汎解析に対する計算負荷の低減を図るため、粗い解析格子（250m矩形格子）で二次元不定流解析を行い、その解析結果による粗い格子の浸水位を基準として、本水位から格子内の詳細地形（50m矩形格子）の地盤高を差し引くことによって詳細地形の各地点の浸水深を補間的に求める手法¹⁴⁾が広く用いられている。この手法は先に示した「解析時に詳細地形を考慮する手法」に対して「解析後に詳細地形を考慮する手法」であり、河川の外水汎解析と比較して汎解析水の流動性が小さい都市内水汎解析の再現に対しても適用できる可能性は十分にあると考える。よって、ここでは本手法の都市内水汎解析への適用を試みる。

ただし、河川の外水汎解析では汎解析水量が大きく、広範囲で大きな水深の冠水が生じるため、本手法によっても浸水深の誤差は許容できると考えられるが、都市内水汎解析では局所的に浸水が生じるため、浸水量や浸水深の誤差が相対的に大きくなる可能性がある。このため、二次元不定流解析結果の取り扱い方法として、河川の外水汎解析に用いられている「浸水位を固定する方法」に加えて「浸水量を固定する方法」も想定し、浸水再現性より両手法の適用性を評価する（図-2）。「浸水量を固定する方法」は粗い格子の汎解析による格子内の浸水量 V を固定し、これを格子内の詳細地形（標高 H -容量 V 関係）に与えることで容量 V に対応する補正浸水位 H' を算出し、

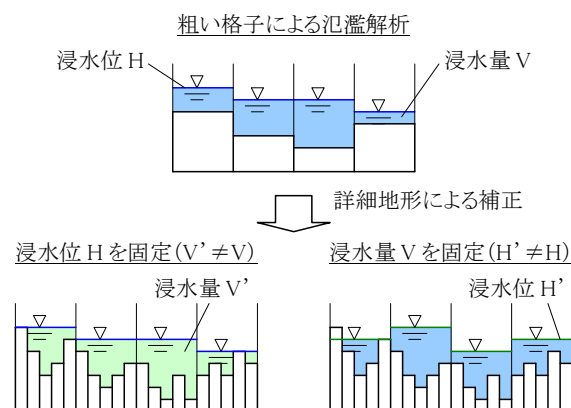


図-2 汎解析結果の詳細地形を用いた補正方法

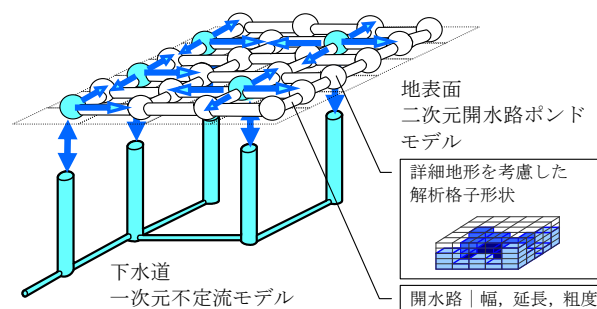


図-3 二次元開水路ポンドモデルによる汎解析のイメージ

この H' から詳細地形の地盤高を差し引くことで詳細地形の各地点の浸水深を補間的に求める手法である。

b) 二次元開水路ポンドモデル

二次元汎解析の計算負荷を低減する方法として、解析環境が進展する以前に適用されていた手法、ここでは「二次元ポンドモデル」¹¹²⁾の適用を考える。本手法は、解析格子を池として表現し、解析格子間を格子状に接続することによって汎解析現象を表現する。この時、解析格子として用いる池の形状を詳細地形より定めることで、詳細地形が考慮できる。二次元ポンドモデルは二次元不定流モデルと比較して計算負荷が大きく低減するものの、 x, y 方向の水理現象を独立に計算するため、外水汎解析のように汎解析水の流動が卓越する場合に浸水の再現精度が悪くなることが指摘されている¹⁾。ただし、本研究で対象とする都市内水汎解析は相対的に汎解析水の流動性が小さく、本手法が適用できる可能性は十分にあると考える。

二次元ポンドモデルは、その解析格子間の接続方法によって越流ポンドモデル、汎解析ポンドモデル、開水路ポンドモデルに分類される¹¹²⁾。ただし、前者の2つの手法は解析格子間の接続に堰や管路を用いるため、計算が不安定となる場合がある¹⁾。よって、ここでは解析格子間を開水路で接続する「二次元開水路ポンドモデル」を対象として、その適用性を検証する。

本研究では、解析格子間を接続する開水路の流れに、下水道管渠と同じ次元不定流解析を適用するが、この時、開水路諸元（幅、延長、粗度）の設定が必要となる。河川の外水汎解析では既往研究より標準的な諸元が示

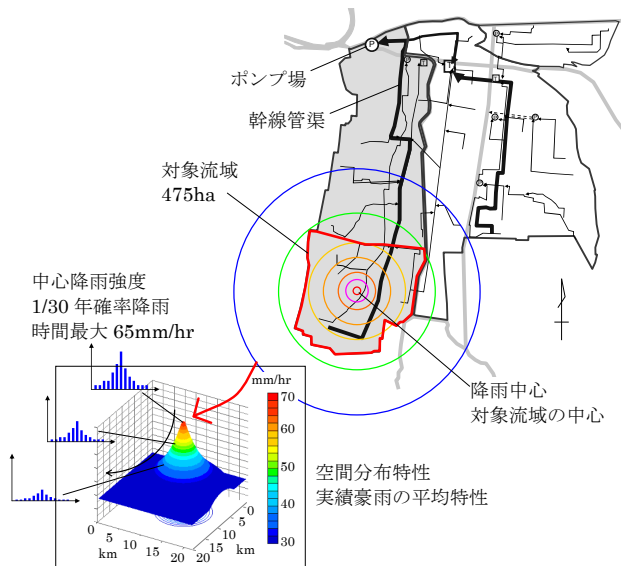


図-4 検討対象流域及び対象降雨のイメージ

されている²⁾ものの、都市内水の氾濫解析に二次元開水路ポンドモデルを適用した事例はなく、その諸元が懸案となる。よって、ここでは開水路諸元が浸水再現性に及ぼす影響を評価したうえで、その結果得られる最適諸元を用いて二次元開水路ポンドモデルの適用性を検証する。

なお、解析格子間を接続する開水路の管底高は解析格子の最低地盤高に設定する。また、浸水時には開水路内にも氾濫水が湛水するため、厳密には開水路容量によって解析格子の池形状を補正する必要があるが、ここでは詳細地形を基とした実地形と整合させることを重視し、解析格子形状の補正は行わないものとする。

4. 実流域への適用および簡素化手法の評価

以上より、さらなる簡素化手法として解析後に詳細地形を考慮する二次元不定流解析モデルと二次元開水路ポンドモデルを対象とし、これらの簡素化手法による氾濫解析結果を2章で構築した詳細氾濫解析モデル及びその簡素化モデルと比較することで、その適用性を検証する。

(1) 検討条件

a) 対象流域

本研究では土地利用や下水整備等、都市化が高度に進展した地区として大阪市のA処理区の上流域475haを対象とする(図-4)。本地区は雨水の全てを合流式下水道で収集し、流末のポンプ場から河川へ放流している。

b) 検討対象ケース

下水道管渠は既往研究¹⁰⁾の結果をふまえ、十分な再現精度が得られる「φ300超過管渠を対象とした一次元不定流解析モデル」を共通的に適用する。

一方、簡素化モデルの地表面流出過程は定型25m²格子(5m矩形格子相当)を基本とするが比較のため、さらな

表-2 簡素化手法の検討ケース

解析手法	設定概要		ケース名	解析 格子数
詳細モデル	建物形状考慮		>幅2m case0	201,188
簡素化 モデル	建物形状未考慮		25m ² 格子 casela	184,813
			625m ² // caselb	7,595
			2500m ² // caselc	2,193
さらなる 簡素化 モデル	二次元 不定流 (解析後 に補正)	浸水位 固定	625m ² // case2-1a	7,595
			2500m ² // case2-1b	2,193
		浸水量 固定	625m ² // case2-2a	7,595
			2500m ² // case2-2b	2,193
	開水路 ポンド	最適 ケース	625m ² // case3a	7,606
			2500m ² // case3b	1,902

表-3 二次元開水路ポンドの検討ケース

解析 手法	設定概要				ケース名
	解析 格子	開水路諸元			
		幅	延長	粗度係数	
二次元 開水路 ポンド モデル	625m ² 格子	3m	10m	0.013	case3-1a
		〃	1m	0.013	case3-2a
		〃	1m	0.100	case3-3a
	2500m ² 格子	6m	10m	0.013	case3-1b
		〃	1m	0.013	case3-2b
		〃	1m	0.100	case3-3b

表-4 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(%)
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	$= (F_k - F_d) / F_d \times 100$ Fk: 各ケースの値 Fd: 詳細モデルの値

る簡素化手法を用いずに単純に解析格子を大きくするケースとして、625m²(矩形25m相当)、2500m²(矩形50m相当)格子による評価も行う。また、ここで検討するさらなる簡素化手法は解析格子の大きさを625m²、2500m²格子とし、25m²格子の詳細地形を用いて解析後の補正、あるいは開水路ポンドの池形状の設定を行う。これより、解析により得られる625m²、2500m²格子の水位から25m²格子の地盤高を差し引くことで精細な浸水深を求めることとなる。なお、二次元開水路ポンドモデルにおいて懸案となる開水路諸元は水路幅を固定として延長と粗度係数が異なるケースを設定し、その影響を評価する。本研究で対象とする解析ケースを一覧として表-2、3に示す。

c) 検討対象降雨および評価指標

局所集中豪雨時の浸水再現に対する簡素化の影響を評価するため、空間的・時間的に集中した特性を有する降雨を対象とする。本研究では、降雨中心より同心円状に低減するとした空間分布特性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じる場合を想定する(図-4)。

また、評価指標は簡素化と精度の関係を明らかにすることを主点とし、浸水リスク評価の観点から既往研究¹⁰⁾と同様に表-4の指標を用いる。本指標の絶対値が大きい場合には再現精度の面から予測運用に対して不適となる。

(2) 評価結果および考察

図-5~7に各ケースの評価結果を示す。本結果より確認された簡素化の影響を以下に整理する。

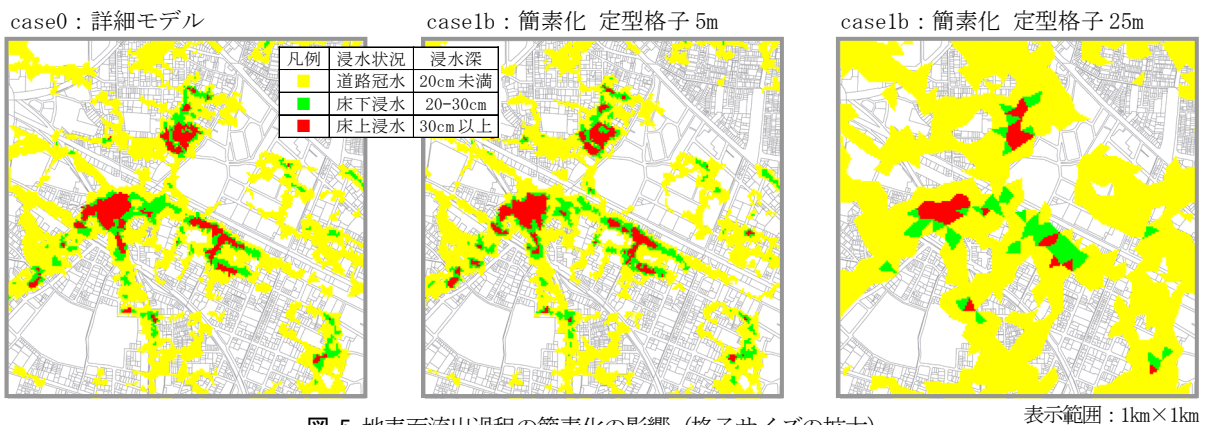


図-5 地表面流出過程の簡素化の影響（格子サイズの拡大）

a) 開水路ポンドモデルの開水路諸元の影響(図-6a)

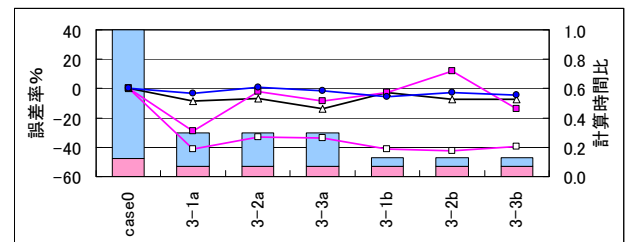
625m²格子で開水路延長を10mとするcase3-1aは床上浸水面積が小さく評価されている。これは、このケースが比較的小さな625m²格子に対して幅3m×延長10mの開水路を適用する一方、解析においては開水路の容量を考慮していないために、その影響が表れたものと考えられる。これに対して、延長1mのケースや格子サイズが大きい2500m²格子のケースでは、開水路容量の影響が相対的に小さいため、床上浸水面積や最大浸水深が十分な精度で評価できている。これより、開水路延長は解析に対する影響を小さくできる1mを採用する。一方、粗度係数の差による大きな違いは見られないものの、case3-2bと3-3bの比較より、床上浸水面積は粗度係数が大きいcase3-3bの方が若干過小評価となっている。これより、粗度係数は浸水リスク評価の観点から安全側の評価となる0.013を採用する。以上より、最適ケースとしては延長を1m、粗度係数を0.013とするcase3-2a、3-2bを採用する。

なお、全ケースを通して総浸水面積がかなり小さく評価され、浸水量も若干小さく評価される結果となっている。これは、解析格子を大きな池と扱うことにより、詳細モデルで見られる最大浸水深や浸水量の非常に小さい箇所が、格子内の地盤高が低い箇所に集約されること等によって、本モデルでは表現できていないためである。ただし、浸水リスクの評価に際しては、浸水リスクが大きい箇所やその大きさの把握、すなわち床上浸水面積や最大浸水深の再現性が重要となる。二次元開水路ポンドモデルはこれらの指標が十分に再現できていることから、浸水リスク評価への適用性が確認できる。

b) さらなる簡素化による影響(図-5, 6b, 7)

前項で最適ケースとして選定した二次元開水路ポンドモデルcase3-2a、3-2bを含めて、簡素化手法の適用による影響を確認する。まず、単純に解析格子を大きくするcase1b (625m²格子)、1c (2500m²格子) では浸水が薄く広がることから、床上浸水面積や最大浸水深が小さくなっており、浸水リスク評価において問題となることが確認できる。これに対して、先に述べたように二次元開水路ポンドモデルでは床上浸水面積や最大浸水深が良好に再現できている。しかし、二次元不定流解析による浸

a) 開水路ポンドモデルの開水路諸元の比較



b) 簡素化手法の比較

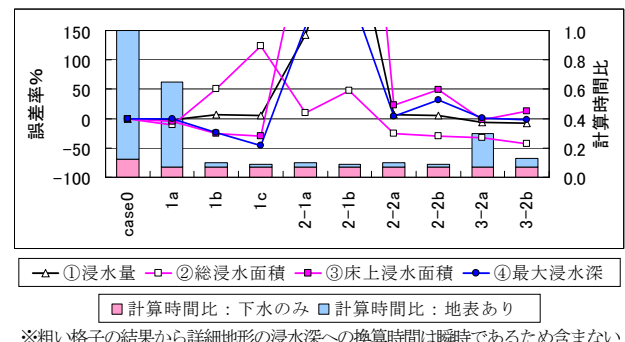
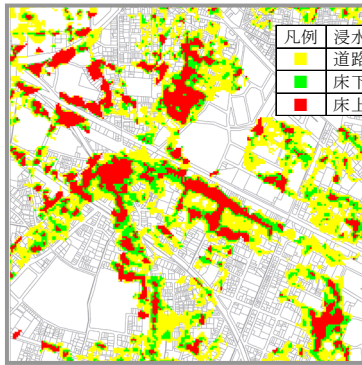


図-6 簡素化ケースの評価結果

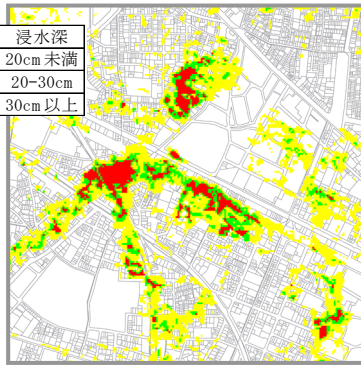
水深を解析後に詳細地形を用いて補正する方法のうち、従来からハザードマップの作成に用いていた「浸水位を固定する方法 (case2-1)」では浸水深が極めて過大に評価される結果となる。これは、二次元不定流解析では平均地盤高上の浸水深が得られるが、浸水深や浸水量が非常に小さい浸水箇所の浸水位を固定すると、解析格子内に含まれる平均地盤高以下の格子にその浸水深が一律適用され、格子内の地盤高に差がある場合に局所的に浸水深が大きくなるためである。本手法は浸水量の収支がとれないため、浸水量も極めて過大に評価されており、都市内水氾濫の評価には適さないといえる。

一方、解析格子内の浸水量の収支を保つ「浸水量を固定する方法 (case2-2)」は、浸水深が小さい箇所の浸水量を計算後に格子内の地盤高が低い箇所に移動するため、最大浸水深や床上浸水面積が若干過大となるものの、浸水リスク上は安全側の評価であり、概ね詳細モデルと同等の結果が得られることが確認できる。ただし、2500m²格子では詳細モデルとの乖離が大きくなることか

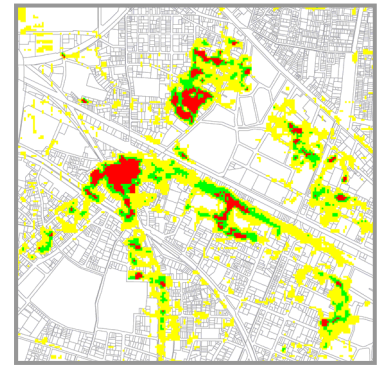
case2-1a : 事後補正 (水位固定)



case2-2a : 事後補正 (水量固定)



case3-2a : 開水路ポンドモデル

図-7 簡素化手法の適用結果 (625m²格子の例)

表示範囲 : 1km×1km

ら、625m²格子程度での適用が妥当と考えられる。

なお、計算時間をみると、詳細モデルに対して、詳細地形を考慮した二次元不定流解析モデルは0.10 (625m²格子)、二次元開水路ポンドモデルでは0.30 (625m²格子)～0.13 (2500m²格子)の時間で計算できている。これより、手法の簡素化によって簡素化モデルの0.6と比べても計算時間を大幅に縮減できる可能性が示唆された。

5. おわりに

本研究では、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の視点から、浸水再現精度と計算負荷縮減の両立が可能となる氾濫解析の簡素化手法を提案・検証した。具体的には、簡素化手法として旧来から氾濫解析に用いてきた粗い格子による二次元不定流解析結果を詳細地形で補間する方法や二次元開水路ポンドモデルを適用する方法を対象とし、これら簡素化手法による氾濫解析結果を実績浸水が再現可能な詳細モデルの結果と比較することで、その適用性を確認した。その結果、都市内水氾濫を対象とする場合には、これらの比較的簡素な手法によっても十分な精度で浸水現象が再現できるとともに、計算時間を大幅に縮減できる可能性があることを確認した。これより、大流域や排水系統が複雑で氾濫計算に時間を要する場合、あるいはリアルタイム予測の視点から計算時間の縮減が求められる場合には、本研究で提案した簡素化手法が有効な手段となると考える。

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、今後は簡素化を含む氾濫解析手法の違いによる浸水再現性の劣化や向上の影響を、減災支援等、予測情報の利用効果の観点から定量的に評価し、リアルタイム浸水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。また、本研究は国土交通省河川技術研究開発制度（河川技術分野）の助成金を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局, リアルタイム浸水予測シミュレーションの手引き(案), 2005.
- 2) 建設省土木研究所 河川部都市河川研究室: 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 川池健司, 中川一, 今井洋兵: 都市域の雨水排水過程に着目した内水氾濫解析モデル, 水工学論文集, 第53巻, pp.817-822, 2009
- 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, pp.393-398, 2009.
- 8) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知, 水工学論文集, 第54巻, pp.919-924, 2010.
- 9) 関根正人: 住宅密集地域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, Vol.67, No.2, pp.70-85, 2011.
- 10) 木村誠, 城戸由能, 中北英一, 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, 水工学論文集, Vol.55, pp.931-936, 2011.
- 11) 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)ー都市浸水ー, 国土技術政策総合研究所資料, 第202号, 2004.
- 12) 武田誠, 松尾直規: 下水道解析を考慮したh-VA氾濫解析モデルに関する検討, 水工学論文集, Vol.54, pp.895-900, 2010.
- 13) Hartnack, J. H., Enggrob, H. G. and Runge, M.: 2D overland modelling using fine scale DEM with manageable runtimes, Flood Risk Management: Research and Practice, pp.119-124, 2009.
- 14) 国土交通省河川局: 浸水想定区域図作成マニュアル, 2005. (2011. 9. 30受付)