

低平地住宅密集地域における 内水氾濫の危険度評価に関する研究

INUNDATION HAZARD IN LOW-LYING URBANIZED RESIDENTIAL AREA
BY SHORT-TIME HEAVY RAINFALL

尾崎平¹・石垣泰輔²・戸田圭一³

Taira OZAKI, Taisuke ISHIGAKI and Keiichi TODA

¹正会員 修士(工学) 関西大学助教 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²正会員 博士(工学) 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

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

Sudden intense rainfalls have occurred frequently in Japan. In stricken urban areas, increased peak runoff levels due to urban expansion, along with greater integration of urban functions and the growing use of underground facilities, have put property and lives at greater risk, and heightened the potentials for inundation damage. In this study, InfoWorks CS that is one of the distributed models was applied to low-lying urbanized residential area in the Neyagawa river basin, Japan. The various patterns of rainfall distribution in two hours durations, inundations have been simulated. The result has indicated that the range of inundation area varies with rainfall distribution when the total rainfall is the same. This study has shown that the map of inundation hazard level and the relationship between hyetograph and the hazard level. This may be useful for considering inundation disaster reduction in urbanized residential area.

Key Words : *inundation hazard, urbanized residential area, short-time heavy rainfall*

1. はじめに

近年、地球温暖化による巨大台風の増加、都市のヒートアイランド現象などの影響による突発的、集中的な豪雨が頻発している。都市部では、不透水面積の拡大によるピーク流出量の増大、さらに都市機能の集積や地下空間施設の利用拡大等、国民の財産や生命が危険にさらされており、その浸水被害ポテンシャルは増大している。2008年には、8月28日から31日に本州付近に前線が停滞し、この4日間に九州から東北地方にかけて、短時間に猛烈な雨量が観測された(平成20年8月末豪雨)。愛知県岡崎市においては、8月29日午前2時までの1時間に146.5mmを観測し、床上、床下浸水に加え、人的被害も生じている。この8月末豪雨による全国の被害状況は死者3名、床上浸水2,500棟以上、床下浸水15,000棟以上に達している¹⁾。また、道路冠水地点も愛知県内の634箇所、埼玉県内の110箇所をはじめ数多く報告されている。

都市部では、下水道の整備率が高く、下水道により雨水排除がなされている。下水道による現在の都市浸水対

策は、5年確率降雨をベースとした計画・設計が多くの自治体でなされている。大阪における浸水常襲地域である寝屋川流域周辺の5年確率降雨の時間降雨量は44.1mm/hrであり、近年、多発している局所的集中豪雨と比較した場合、十分な水準ではない。さらに、その5年確率降雨に対する都市浸水対策達成率は、平成19年度末で約54%であり²⁾、下水道が整備されている地域の約半数の地域では、未だ、都市浸水対策自体が不十分な状態である。そのため、住民自身による都市浸水対策(自助)が求められる。

下水道は地下に埋設されているため、河川のように直接、見ることはできないため、住民は、現在、水深がどの程度まで上昇しているのか、あとどれぐらいの降雨で下水道のマンホールから溢水が生じるのか、あるいは、今後の雨量や降り方によってどの程度浸水が生じるのか等は判断できない。また、短時間の局所的集中豪雨のために、行政担当者からのビルの地下室等の小規模な地下空間からの避難や地盤高の低い地域への浸水警戒態勢を指示する等の災害警戒情報の発令が住民に伝達されない

ことも考えられる。現在、降雨情報は、気象庁や国土交通省により公開されており、インターネットや携帯電話からリアルタイムで雨量に関する情報を入手することが可能である。そのため、行政担当者の適切な災害警報情報の発令や住民自身が降雨情報を基に浸水の危険度を判断できるように、事前に流出解析ならびに氾濫解析を用いて、雨量や降雨分布と浸水状況の関係を整理しておくことは重要である。そこで本研究では、低平地密集住宅地域である寝屋川流域の一部を対象に、下水道管きよ中の水の流れと下水道マンホールからの溢水による氾濫解析が行える分布型モデルを用いて、短時間豪雨時の氾濫解析を行い内水氾濫の危険度評価を行った。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

これまで水害に関しては、内水氾濫よりも外水氾濫に主眼がおかれてきた。しかし、外水氾濫よりも内水氾濫の方が1回当たりの被害額は低いが、発生頻度が多いため、平成6年から平成15年までの10年間における被害額は、外水被害額1.3兆円、内水被害額1.2兆円とほぼ同程度となっている²⁾。東京などの都市部においては内水被害額の方が大きい。そのため、これからは内水に主眼をおいた研究も必要である。

大西ら³⁾が行っている水深や比力による地下空間からの避難困難度は、本研究における危険度評価の判断指標として有益である。戸田ら⁴⁾や関根・河上⁵⁾は都市部の地下空間に着目した浸水解析を行っており、地上と地下の統合モデルや地下空間を含む内水氾濫解析モデルを、また、川池ら^{6,7)}は外水と内水の総合氾濫解析モデルを提案している。いずれもこれまでの不連続であった部分を連続解析できる手法であるが、統合モデルのため下水道システムの枝線管きよの省略や簡略化等がなされている。しかし、都市部の内水氾濫は下水道管きよの枝線から生じることもあり、枝線を含む下水道システムを詳細にモデル化することは重要と考えられており、関根ら⁸⁾は、下水道システムを厳密に考慮した解析を行っている。そこで、本研究では下水道システムの詳細なモデル化、解析が可能な分布型モデルであるInfoWorksを用いることにした。以前のバージョンでは地表面の氾濫解析が不可能であったが、バージョン8.5以降では、二次元氾濫解析が可能であり、下水道システムからの溢水、地表面氾濫、再流入といった下水道システムと地表面氾濫の連動した解析が可能である。本ソフトを解析ツールとして活用し、近年、被害が増加している短時間豪雨による内水氾濫に対して、住民ならびに行政が降雨情報を基にした自助行動あるいは災害警戒情報の発令等を行う際に必要となる豪雨と浸水状況の関係を定量的に明らかにした。

また、水害の危険度評価に関する研究では、主に外水氾濫を対象に、大塚ら⁹⁾、徳永ら¹⁰⁾が行っている。近年

の短時間集中豪雨による危険度評価であるが、外水氾濫を対象としたものであり、降雨規模も非常に大きく、また対象地域も都市部ではなく地方であるため、氾濫特性等が都市部とは異なると考えられる。本研究では、都市化の進んだ低平地住宅密集地域である寝屋川流域の一部を対象に、流出、氾濫解析を行い、雨量と降雨分布の違いによる浸水状況の関係を明らかにし、危険度評価に基づく内水氾濫対策のあり方について考察した。

3. 解析手法と低平地住宅密集地域への適用

(1) 解析モデル

本研究では、分布型モデル（InfoWorks CS Ver. 8.5.2）を用いて解析を行った。本分布型モデルは、有効降雨モデル、地表面流出モデル、管内水理モデル、地表面氾濫解析モデルから構成されている（図-1）。

観測された降雨をインプットデータとし、各地表面（道路、屋根、浸透域）に応じて、有効降雨を算定し、単一貯留池モデルにより地表面流出量を算定する。地表面流出量が管内水理モデルのインプットデータとなり、管きよ内水理は、サン・ブナン式（圧力時はプライスマン・スロットモデル）により計算される。地表面氾濫は非構造格子による二次元不定流解析である。マンホールから格子への溢水量および格子からマンホールへの流入量は、堰の公式を用いており、地表面氾濫解析と管内水理解析は連動している。

(2) 対象地域

対象地域は、1997年7月、8月において、下水道からの溢水による3度の床上、床下浸水が生じ、かつ浸水データが得られたことから、大阪府寝屋川北部流域下水道計画区域の桑才排水区（829.57ha）と菊水排水区（196.23ha）とした。両排水区は、鴻池処理場の集水域3,990.2ha内の地域であり、行政区域として寝屋川市、守口市、門真市にまたがる人口約18.7万人の合流式下水道整備地域である（図-2）。対象地域内には、排水路として古川と西三荘水路があり、ともに寝屋川に流入している。交通機関は京阪電鉄が区域のほぼ中央部を、国道1号線が北側を横断し、また南北に大阪中央環状線が縦貫し、それぞれ交通の動脈となっている。これらの交通機関に沿い、

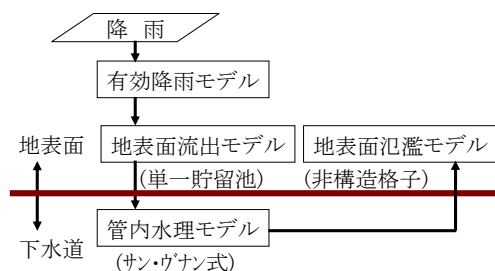


図-1 分布型モデルの構成

住宅地で構成される大きな市街地があり、その周辺は住宅地と工業・事業で形成されている。対象地域の土地利用状況は、道路面145.59ha(14.2%)，屋根面403.18ha(39.3%)，浸透面477.03ha(46.5%)である。

(3) 計算条件

有効降雨量はInfoWorksに組み込まれている初期損失モデルと流出係数モデルを用いて算定した。パラメータの設定は既往研究¹¹⁾を参考に設定した(表-1)。道路や建物レイヤーはGIS(ソフト名：SIS)を用いて作成し、分布型モデルの解析条件に与えた。下水道システムのモデル化は内径500mm以上の管きよを対象とした(Nodes(人孔)数：1,486, Links(スパン)数：1,519, Sub catchments数：920)。なお、地表面流出モデルおよび管内水理モデルのパラメータはデフォルト値を用いた¹²⁾。

地表面流出解析は2次元地表面氾濫流解析モジュールを用いた。地形は、TIN (Triangulated Irregular Network) 地形をノードの平面座標と標高データから作成した(図-3)。地表面解析の非構造格子(非定形三角形メッシュ)は、最大面積100m²，最小面積25m²とし、分布型モデルのメッシュ生成機能を用いて自動的に作成した(非定形三角形メッシュ数：158,668)。なお、本研究で使用した氾濫解析モジュールのパラメータであるメッシュの粗度係数については、全メッシュにおいて0.0125とした¹²⁾。また、マンホールと地表面の水の行き来(溢水と流入)は堰の公式を用い、流量係数は0.5とした¹²⁾。

(4) モデルの検証と考察

a) 管内水理モデル

モデル化の妥当性の検証について、管きよの流出解析のキャリブレーションには総降雨量54.5mm～89.5mm，時間最大降雨量18.5～25.5mm/hrの3降雨を対象に、流末の菊水ポンプ場と桑才ポンプ場の吐出量の実測値と解析値を用いて評価を行った。一例として、総降雨量54.5mm，時間最大降雨量21.5mm/hr，降雨継続時間6時間の降雨の再現結果を図-4, 5に示す。図-4の4:30～4:40に流量がわずかに負の値を示している。これはポンプの下流側の管きよでの流量を、ポンプ場からの吐出量としているために、ポンプ場への流入水量が少ない時間帯において、ポンプのon-offの影響で逆流する場合があるためである。そのような時間帯を除いては、他の検証降雨においても、図-4, 5と同様に、解析値は実測値を概ね再現できている。そのため、下水道システムのモデル化ならびに管内水理モデル等のパラメータの設定は妥当であると考えられる。

b) 地表面氾濫解析

地表面氾濫解析については、1997年に実際に床上、床下浸水が生じた3降雨(表-2)を用いて評価した。

一例として、最も被害の大きかった8月7日の結果を図-6に示す。なお、結果は、流域内において浸水箇所が

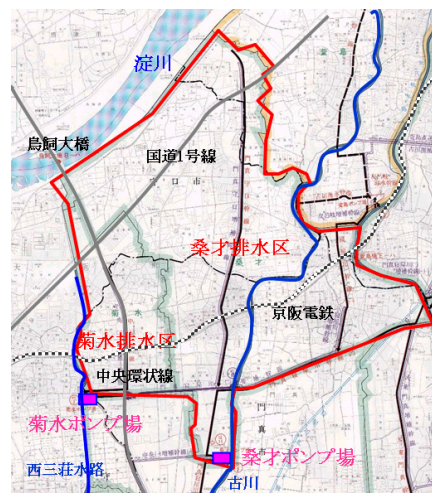


図-2 対象地域

表-1 有効降雨量の計算条件

地表面タイプ	道路面	屋根面	浸透面
初期損失(mm)*1	1.4	1.5	5.9
流出係数	0.90	0.85	0.45

*1: 初期損失は、地表面タイプと地表面勾配に依存するため、同じ地表面タイプでも異なる。ここでの値はマンホール毎の集水域の平均値。

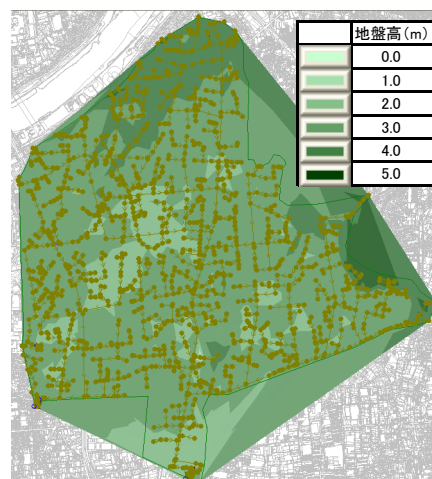


図-3 下水道ネットワーク及び地盤高図

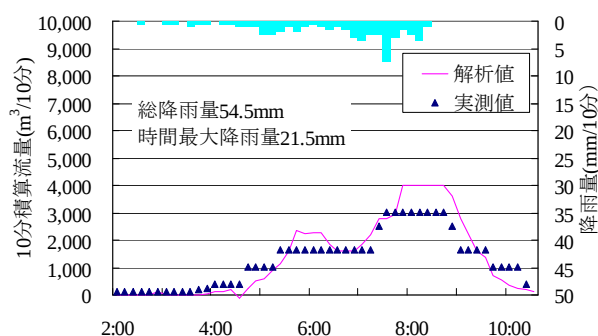


図-4 管内水理モデルの妥当性の検証結果(菊水ポンプ場)

集中している部分を切り出している。

浸水実績の元データが床下浸水，床上浸水，道路冠水等のデータから作成されているため，実績と解析の比較には，格子内の浸水深が10cm以上の部分にて比較を

行った。図-6より、実績と解析結果が全ての地点において一致しているわけではないが、浸水範囲の広い地点等では、浸水地点が一致している。また、一致していない地点においては、実績地点よりも上流あるいは下流側にて解析上、浸水が生じている場合もあることから、全般に、計算結果は実績を概ね再現できている。これより地表面氾濫のモデル化、パラメータは妥当と考えられる。

4. 短時間集中豪雨に対する危険度評価

(1) 短時間集中豪雨による危険度指標の定義

近年の内水被害が短時間豪雨により相次いで生じていることから、継続時間2時間の降雨を外力とし、計算を行った。危険度指標は対象降雨に対して、浸水なし（危険度B）、浸水深20cm以下の浸水発生（危険度A）、浸水深20cm以上の浸水発生（危険度AA）の3段階とした。

設計外力は、総降雨量を30mm、40mm、60mm、100mmの4ケースを設定し、表-3に示すように1時間目降雨量と2時間目降雨量を5mmずつ変化（1時間目は-5mm、2時間目は+5mm）させて、対象地域内に一様に降ると仮定して計算を行った。時間降雨による解析を行った理由は、住民が自助行動の判断をする際に入手する降雨情報が時間雨量のためである。なお、計算時間は短時間降雨の前後に3時間ずつブランクを入れ、合計8時間とした。

(2) 解析結果および考察

総降雨量30mmでは、いずれの組合せにおいても対象地域で浸水は生じなかった。また、総降雨量40mmでは、R40-0（1時間目40mm、2時間目0mm：以下同様）ならびにR5-35の組合せにおいて、総面積の1%未満のわずかのエリアにおいて浸水が生じたが、他の組合せでは浸水が生じなかった。R35-5（前ピーク）で浸水が生じず、R5-35（後ピーク）で浸水が生じたのは、凹地貯留や浸透等の初期損失の影響によるものと考えられる。また、この結果より、本対象地域における雨水排除能力は、時間降雨量で40mm/hr程度であり、これを超える場合には浸水が生じることが明らかとなった。

総降雨量60mm、100mmのケースについて、降雨の組合せと浸水面積（危険度A）の関係を図-7、8に示す。総降雨量60mm、100mmのいずれのケースも、1時間に集中して降った場合に浸水面積が最大となる。また、本検討から、総降雨量が同じでも、降雨分布により、浸水範囲が大きく異なることが明らかとなった。降雨分布の違いとして、総降雨量40mmの場合と同様に、前ピーク型の降雨よりも後ピーク型の降雨の方が浸水範囲は広がっている。特にR40-20とR20-40、R35-25とR25-35のように時間降雨量が40mm以下になるような場合は、前ピークではほとんど浸水が生じないのに対して後ピークでは相対的に浸水範囲が広がっている。本排水区の雨

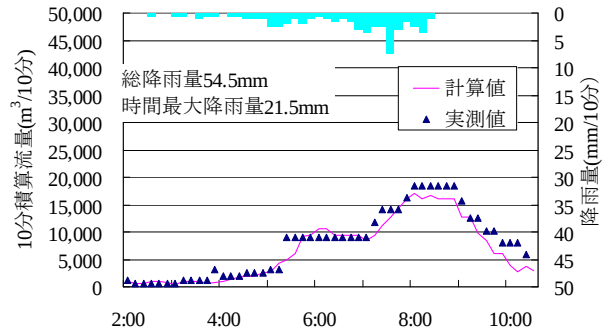


図-5 管内水理モデルの妥当性の検証結果(桑才ポンプ場)



図-6 地表面氾濫解析の比較結果(97/8/7)

表-2 地表面氾濫解析の対象降雨(実績浸水降雨)

Date	時間最大降雨量(mm/hr)	総降雨量(mm)	床上浸水(件)	床下浸水(件)
97/7/13	38.5	158.5	50	2,858
97/8/5	43.5	60.0	2	415
97/8/7	62.0	86.0	221	4,627

表-3 設計外力のケース

総降雨量	30mm		40mm		60mm		100mm	
ケース	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr
R ₁ (1)	30	0	40	0	60	0	100	0
R ₁ (2)	25	5	35	5	55	5	95	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
R ₁ (n-1)	10	20	10	30	10	50	10	90
R ₁ (n)	5	25	5	35	5	55	5	95
n=	6		8		12		20	

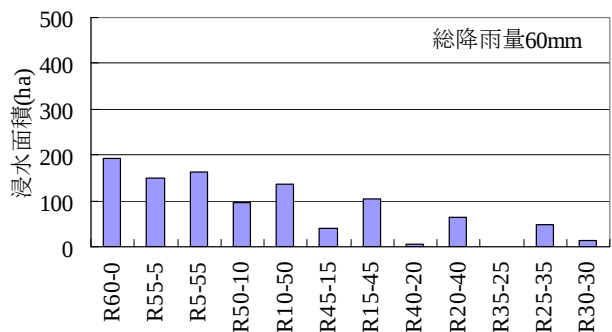


図-7 総降雨量60mmのケースにおける浸水面積(危険度A)

水排除能力は、時間降雨量40mm/hr程度であるが、前ピーク型の降雨に対しては、浸透型の対策施設等、初期損失量を増大させることが浸水対策として特に有効であると考えられる。

次に図-9に短時間集中豪雨と浸水深20cm以下の浸水発生(危険度A)の面積割合を示す。総降雨量が60mmの場合、時間降雨量が50mm以上になると排水区全体の10%以上のエリアで浸水が生じる。また、総降雨量が100mmの場合、降雨分布にかかわらず、排水区全体の20%以上が浸水し、時間雨量が70～80mmを超える場合には30%以上のエリアが浸水することが明らかとなった。次に各降雨ケースにおける浸水範囲が最大と最小になる降雨パターンでの最大浸水深の状況を図-10に示す。また、危険度評価表を表-4に示す。降雨ケースR40-0、

R30-30では最大浸水深が15～25cm程度であり、時間もわずかの間だけである。そのため、自助として、床下浸水に備えるよう玄関先等に防水板や土のうなどを準備する必要がある。さらに、R60-0、R50-50、R100-0では、最大浸水深が0.5mを超える地点も生じている。また、表-4の危険度評価表からも、総降雨量40mmまでは、危険度もAランク以下であるが、総降雨量60mmを超えると危険度はAAランクになることから、避難困難になる箇所も生じる。特に図-10より本排水区では国道1号線の南側のエリアは地盤高が低いため、溢水が生じやすく、また、水が集まりやすいエリアとなっている。そのため、時間降雨量60mm/hrを超えるような降雨が予測された場合には、ビルの地下室等の小規模な地下空間からは速やかに避難する必要がある。

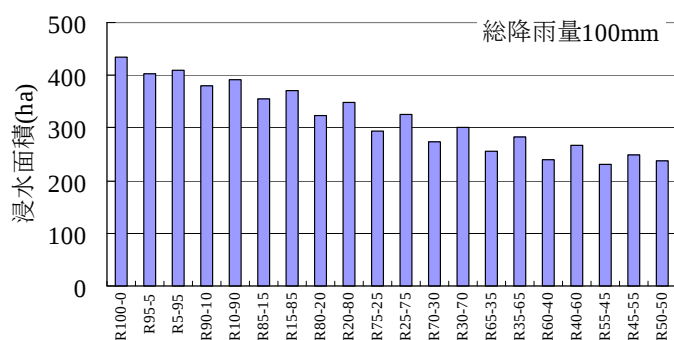


図-8 総降雨量100mmのケースにおける浸水面積(危険度A)

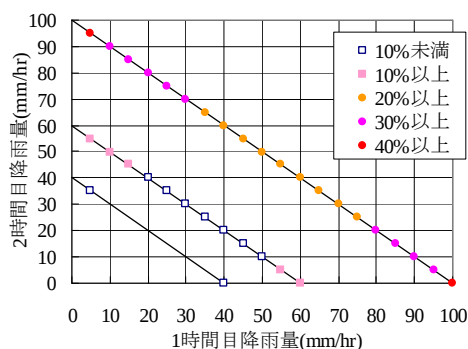


図-9 短時間集中豪雨と危険度Aの面積割合の関係

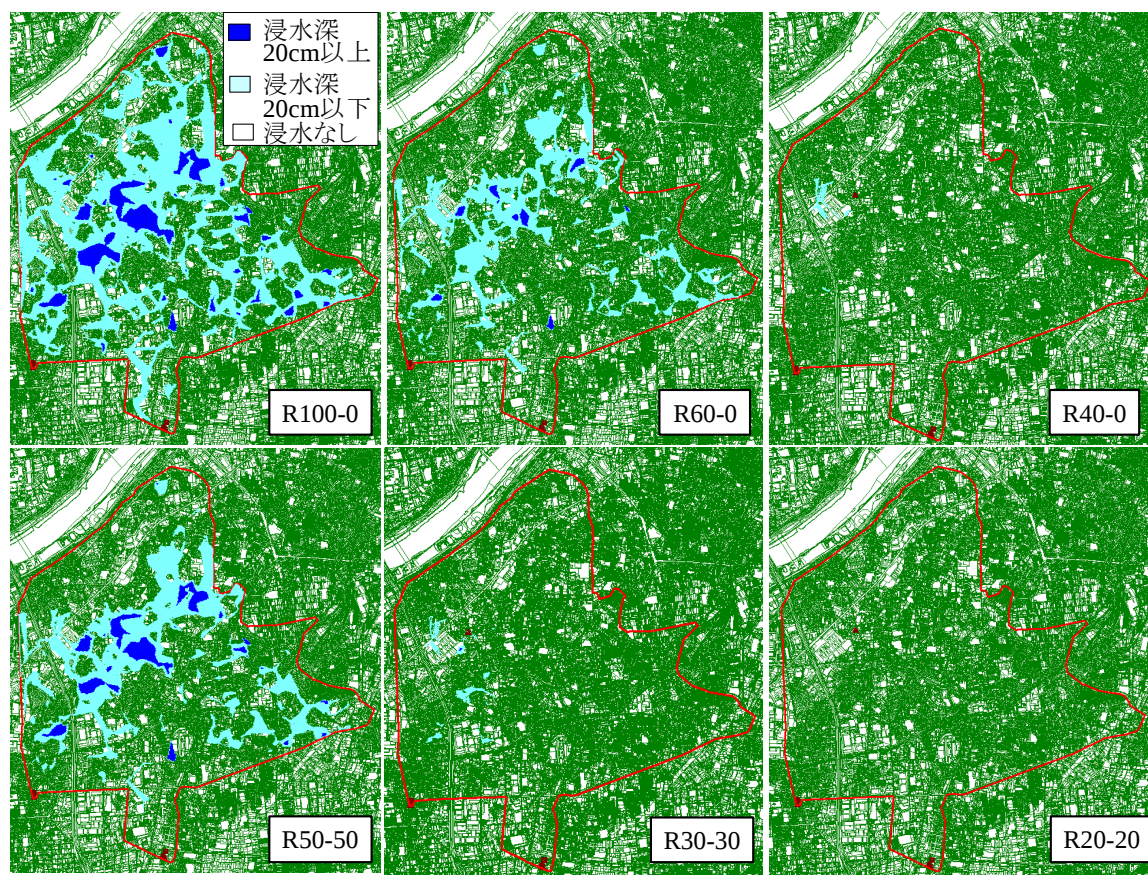


図-10 最大浸水深の結果例

表-4 危険度評価表

総降雨量	1時間目	2時間目	危険度	総降雨量	1時間目	2時間目	危険度
30mm	30	0	B	100mm	100	0	AA
	25	5	B		95	5	AA
	20	10	B		90	10	AA
	15	15	B		85	15	AA
	10	20	B		80	20	AA
	5	25	B		75	25	AA
40mm	40	0	A		70	30	AA
	35	5	B		65	35	AA
	30	10	B		60	40	AA
	25	15	B		55	45	AA
	20	20	B		50	50	AA
	15	25	B		45	55	AA
	10	30	B		40	60	AA
60mm	5	35	A		35	65	AA
	60	0	AA		30	70	AA
	55	5	AA		25	75	AA
	50	10	AA		20	80	AA
	45	15	AA		15	85	AA
	40	20	AA		10	90	AA
	35	25	AA		5	95	AA
	30	30	AA				
	25	35	AA				
	20	40	AA				
	15	45	AA				
	10	50	AA				
	5	55	AA				

5. 結論

本研究では、低平地密集住宅地域である寝屋川流域の一部（菊水・桑才排水区）を対象に、下水道管きょ中の水の流れと下水道マンホールからの溢水による氾濫解析が行える分布型モデルの一つであるInfoWorks CSを用いた内水氾濫解析結果を基に短時間集中豪雨による内水氾濫の危険度評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 管路内水理と地表面氾濫を同時に扱える分布型モデルを用いて、1997年7、8月豪雨による内水氾濫の再現計算を行った。計算結果は浸水実績と概ね合致しており、本モデルが適用できることを示した。
- 2) 継続時間2時間の短時間集中豪雨を外力として対象排水区に与えて解析を行った結果、本排水区では時間降雨量40mm/hrを超える場合には浸水が生じることを明らかにした。
- 3) 総降雨量が同じでも、前ピーク型の降雨よりも後ピーク型の降雨の方が浸水範囲は広く、降雨分布により、浸水範囲が大きく異なることを示した。また、この結果より都市部の浸透域が少なく、流出時間が早い地域では、前ピーク型の降雨に対して、浸透型の対策施設等、初期損失量を増大させることにより浸水被害を軽減できることが示唆された。
- 4) 事前の降雨情報をもとにした短時間集中豪雨に対する危険度を判断できるように降雨と浸水被害の面積割合、降雨と危険度の関係を示し、さらに降雨と排水区内の浸水状況の関係を示した。

本研究において、総降雨量が同じ場合でも、降雨分布により、その被害状況が大きく異なることを示したこと

により、住民は降雨情報を基にした自助行動の判断が可能となると考えられる。また、行政は降雨予測データをもとに住民に対して、適切な災害警戒情報の発令が可能になると考えられる。

今後の課題として危険度ランクを低減する具体的な浸水対策案の検討ならびに道路冠水地点の特定と迂回ルート情報の発令タイミング等についてさらに考察を行う。

謝辞：下水道管路データ、被害状況等の資料を提供してくださった大阪府、門真市、守口市、寝屋川市の関係各位に感謝いたします。なお、本研究の解析・評価は得られたデータを基に独自に行ったものである。本研究は科研費(18710148)の助成を得たものである。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成20年8月末豪雨による被害状況等について（第7報）、平成20年9月11日作成、2008。
- 2) 国土交通省：都市・地域整備局下水道部HP、
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/yakuwari/sinsui.html>
- 3) 大西良純、石垣泰輔、馬場康之、戸田圭一：地下空間浸水時の避難困難度と利用者の水防意識について、水工学論文集、Vol.51, pp.559-564, 2007。
- 4) 戸田圭一、川池健司、深草新、山本大介：地上・地下を統合した都市水害モデルによる神戸市の地下街浸水解析、地下空間シンポジウム論文・報告集、Vol.13, pp.225-230, 2007。
- 5) 関根正人、河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析、土木学会論文集、No.789, pp.47-58, 2005。
- 6) 川池健司、野口正人、井上和也、戸田圭一：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析、土木学会論文集、No.761, pp.57-68, 2004。
- 7) 川池健司、中川一、市川温、丸山寛起：平成18年7月豪雨による松江市内の都市水害に関する数値解析的検討、水工学論文集、Vol.51, pp.535-540, 2007。
- 8) 関根正人、中村淳、中村康朋：河川からの越水を伴う都市域の内水・外水氾濫課程に関する数値解析、水工学論文集、Vol.52, pp.865-870, 2008。
- 9) 大塚健太、戸田圭一、米山望：短時間降雨情報に基づく中小河川の洪水氾濫危険度予測法の提案と新潟県中小河川への適用、河川技術論文集、Vol.14, pp.229-234, 2008。
- 10) 徳永智宏、戸田圭一、川池健司、間嶋真嗣：短時間豪雨による都市域河川の危険度解析、河川技術論文集、Vol.11, pp.25-30, 2005。
- 11) 舩岡靖明、市川新、古米弘明：下水道台帳データベースと細密数値情報を利用した分布型モデルによる都市雨水流解析、下水道協会誌、Vol.38, No.469, pp.79-89, 2001。
- 12) Wallingford Software Ltd.: InfoWorks CS v8.5 Documentation, 2008。

(2008. 9. 30受付)