

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

STUDY OF SIMPLIFIED INUNDATION FORECASTING AND RISK EVALUATION FOR HEAVY STORMS IN URBAN AREAS

中根和郎¹・松浦玲子²・藤原 直樹³・笹山隆⁴

Kazurou NAKANE, Reiko MATUURA, Naoki FUJIWARA and Takashi SASAYAMA

¹正会員 (独)防災科学技術研究所 総合防災研究部門長 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

²(独)防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

³正会員 工修 (株)建設技術研究所 東京本社水システム部次長 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

⁴正会員 (株)建設技術研究所 東京本社水システム部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

In recent years, floods have been causing a lot of damages in the urban areas where are away from rivers. Most of the people do not recognize these areas become dangerous zones causing sever damages to peoples and properties at the flood time, because these are not associated with rivers. In this study, the simplified model to predict the areas with the risk of deep submergence and to evaluate the degrees of danger for the flood disaster were developed.

Key Words: inundation forecasting model, risk evaluation, urban areas and heavy storm

1. はじめに

都市域では、ビル等の建物が林立し、その間を道路が網の目のように走り、それに沿って側溝や下水道暗渠等の雨水排水設備が敷設されている。一旦、計画排水規模を上回る豪雨が発生すると都市下水道、側溝、小河川などから雨水が溢れ出し、それらは主に道路を伝って低い方へ流れ、河川沿いの低地部、道路のアンダーパス部、谷や低地部を横断する盛り土道路や盛り土線路の上流付近に一時的に深く湛水し、浸水被害を引き起こす。その結果、普段は河川と関係していない場所が非常に危険な場となり大きな人的・物的被害が生じる場合が過去に幾度あった。

そのため本稿では、都市域において豪雨が発生した場合に、どこが、どの程度危険になるのかを簡易に推定するための実時間浸水位予測法とそれら予測結果に基づく浸水被害危険度評価法について検討した。

具体的には、都市域の特有の凹地部での深い湛水区域と流速が速くなる坂道等の危険個所の特定に重点を置き、ネットワーク型次元不定流解析モデルを用いて、各地点の浸水位を簡易に実時間で予測する浸水予測モデルの開発を行った。また、住民が普段は水害に対して危険な区域とは気付かないような周辺地域で、水害時に危険な

箇所が、どこに、いつ、どのように発生するかを明らかにするために、浸水予測より得られる浸水深や流速等の氾濫情報と、建物や危険物などの地物情報等を組合せた浸水被害危険度評価法を検討した。

なお、本研究では自治体が導入しやすく、かつ防災担当者等が簡易に実時間で浸水予測および危険度評価を行えるシステムの構築を目指しており、以下の点を十分配慮して検討を進めた。

- ・詳細な道路網や標高等の新たなデータ取得は最少限に留め、既存データや市販データを最大限に活用する。
- ・浸水予測モデルの構築が容易、安価かつ短時間ででき、実時間の浸水予測に適すると共に、施設等の地域の状況変化に対してもモデルの再構築が容易にできることを考慮して、入出力インターフェースが充実し、計算の安定性や演算速度が確保されている実績のある市販水理解析ソフトウェアを活用する。

2. 浸水予測モデルの検討

(1) 予測すべき浸水の状況

豪雨が発生した場合、都市下水道、側溝や小河川で流下できなかった雨水が主に道路に溢れ出し、これらは道

表-1 浸水予測モデル構築のために必要となる情報項目、入手・作成方法および精度

必要情報項目		当面の入手・作成方法	精度※
モデル構築	道路諸元 ・道路配置、幅 ・交差点標高	1/25,000 レベルの既存（市販）GIS、都市計画図（1/2,500～1/10,000）などより作成	1/2,500～1/25,000
	下水道諸元 ・管渠配置、構造 ・マンホール位置、地盤高 ・排水ポンプ、分水人孔等構造物諸元 等	下水道台帳、施設配置・区間割平面図、流量表（下水道 DB が整備されている場合はこれを活用）より作成	1/2,500～1/25,000
	河川諸元（河川位置（平面形状）、縦横断面形状 等）	河川平面図、縦横断面図より作成	1/2,500 程度
	地盤高 ・メッシュ地盤高 等	都市計画図、地形図等の基準点標高、標高コンタ又はレーザーデータより作成	5～100m メッシュ程度
	土地利用、被覆の状況 ・流出係数 等	用途地域図又は土地利用区分図をもとに面積集計し、流出率を算出	1/25,000 程度
	地下街、地下室等の地下構造物諸元 ・地下施設位置、入口形状、高さ、容量 等	個別の調査が必要	—
	氾濫域（間地）諸元 ・氾濫域面積、地盤高 等	都市計画図、地形図等の基準点標高、標高コンタ又はレーザーデータより作成	5～100m メッシュ程度
	流域施設諸元（防災調整池諸元、浸透施設諸元 等）	個別の調査が必要	—
予検証および	下水道管渠施設水文情報 ・管渠水位、流量、ポンプ排水量 等	管渠の水位・流量データはほとんど観測されていない ポンプ排水量は入手可	5～10 分間～1 時間
	河川水文情報 ・河川水位、流量 ・河川構造物操作状況 等	河川水位、流量は河川水文情報 DB より入手	5～10 分間～1 時間
	浸水状況 ・浸水エリア、浸水深 等	個別の調査及び住民からの被害届より整理（洪水後に入手）	精度低 経時変化は不明

※標高の記載について 1/2,500 都市計画図及びこれを基図とした GIS データ：交差点等に 0.1m 単位で記載（誤差±20cm 程度）
レーザーデータ（航空レーザー測量）：平面 20m ピッチ程度等高密度で表記（誤差±15cm 程度）
下水道台帳及びこれを基図とした GIS データ：マンホール地点等に 0.001m 単位で記載

表-2 浸水予測手法の特徴及び適応限界

種別		特徴	適応限界、留意点
1次元ポンドモデル		浸水域を1つの池（ブロック）と考えるため、浸水の有無を最も簡易に表現可能。	氾濫域流れ等の詳細な浸水現象は表現不可。下水道能力分の別途考慮が必要。
1次元ネットワーク	道路	道路網をネットワーク化するため、道路の浸水、氾濫流の流下状況を表現可能。	下水道能力分を降雨から控除する必要がある、下水道能力を正しく評価できない場合がある。必ず凹地が湛水する。
	下水道	下水道網をネットワーク化するため、下水道の雨水流下能力超過により浸水する箇所が把握可能。	氾濫流の表面流れは表現できない。
	道路+下水道（+河川、地下施設・間地）	道路網と下水道網とともにネットワーク化するため、下水道の能力を超えた雨水と、それが道路を流下する流れの両方を表現可能。	氾濫流は道路網を通じてしか表現できない。
2次元	平面2次元（矩形）	氾濫域をメッシュ表現することにより、氾濫流の平面的な広がりを表現可能。	道路網を通じた氾濫流れを表現することができない。 下水道能力分の別途考慮が必要。
	平面2次元（任意形状）	メッシュを道路形状に合わせることで、道路網に沿った流れを表現可能。	モデル化に多大な労力が必要となる。 下水道能力分の別途考慮が必要。

路網を伝って低い方へ流れ、凹地や低い土地に湛水することから、道路の浸水深が予測すべき最も重要な項目となる。また、道路上の人的被害を考えた場合、道路のアンダーパス部やカルバート部などでの坂道で流速が速くなり、危険となることが想定される。このことから、道路上を流下する氾濫流の流速も重要な項目となる。

従って、本研究では、以下の2つの項目の定量的な評価を可能とするモデルの構築を検討した。

- ・道路上の浸水深
- ・道路上の氾濫流の流速

(2) 必要となるデータ項目および精度

浸水予測モデルでは、1)モデルを構築するための基礎情報と、2)モデルのキャリブレーションやオンライン予測を行うための情報の、2種類の情報収集が必要となる。

表-1にそれぞれの必要情報項目、入手・作成方法および各データの精度を示した。これらの中には、現在比較的容易に収集できるものと、将来入手が可能となると考えられるものが有るので、モデル化に際しては、次項で述べるモデル化方法を選択した上で、地域のデータ整備状況や必要とされる浸水予測精度等を考慮し、適切な項目やそれらデータの精度情報を取得する必要がある。

(3) 浸水予測手法の検討

現在、日本で主に使われている浸水予測手法は、以下の3つのモデルに大別される。表-2に各手法の特徴や留意点を挙げた。

- ・1次元ポンドモデル
- ・1次元ネットワークモデル
- ・2次元モデル

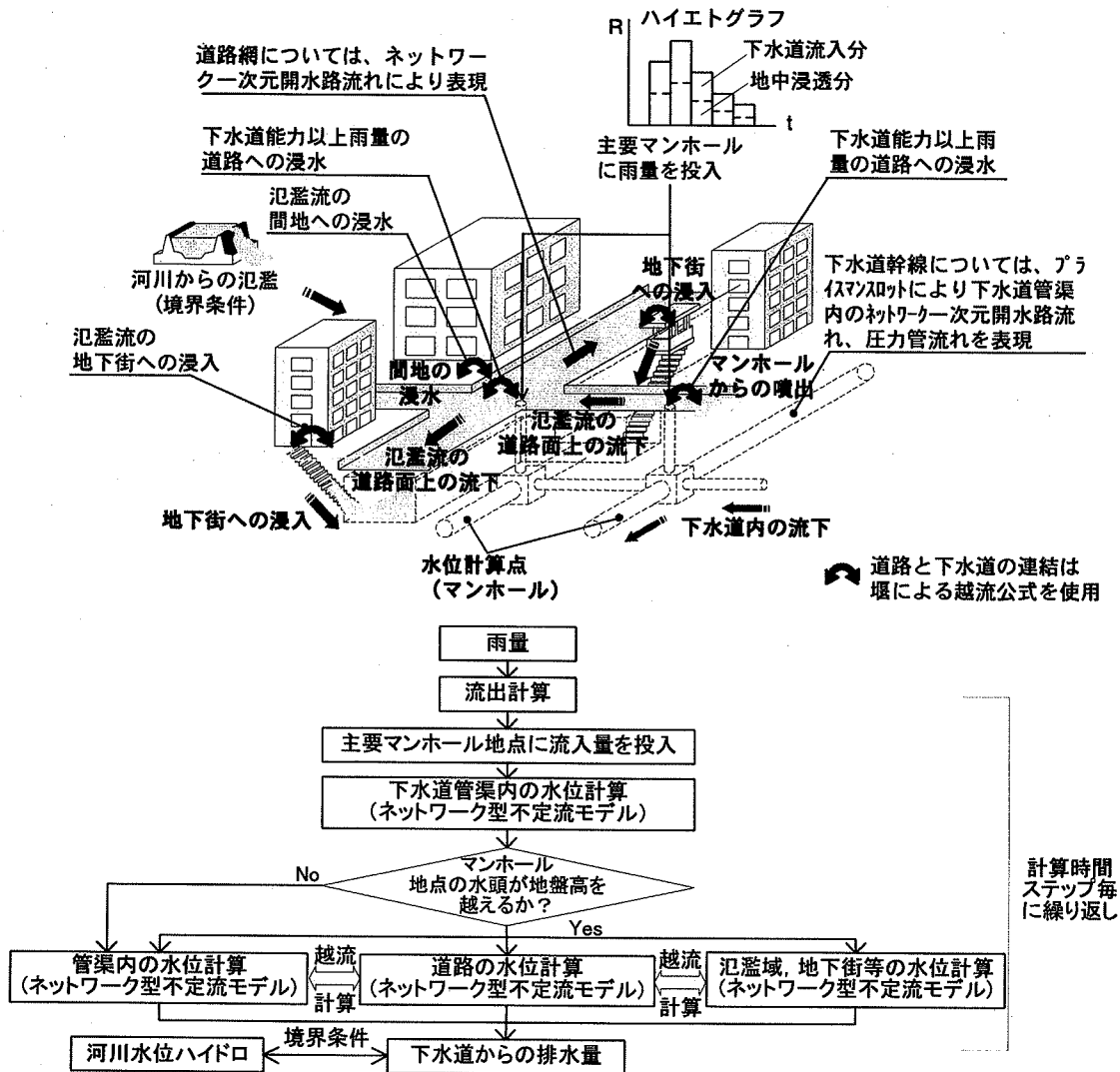


図-1 1次元ネットワークを用いた浸水予測計算方法

本研究で対象とする都市域の浸水予測モデルの必要条件は以下の通りである。

- ・道路、下水道管渠などの任意の地点における水位、流速などを時系列で把握できること
- ・道路の高さや形状の変化、ループ・ネットワーク状となった道路、河川、下水道管渠等や、堰、ポンプなどの構造物が、実際に即したかたちでモデル化できること
- ・雨水の道路への氾濫状況、氾濫水の地下街や地下室への浸入状況などを把握することができること

現在、大河川からの破堤氾濫等をシミュレートする際には、2次元矩形メッシュモデルが一般的に用いられているが、本研究で対象とする都市域の浸水状況を適切に評価するためには、1次元ネットワークモデルもしくは道路形状や高さを考慮してメッシュ分轄した2次元モデルが必要となる。2次元モデルは表-2に示したように、モデル化に多大な労力を要することから本研究が目的とする簡易なモデル化、実時間の浸水予測を考えると、1

次元ネットワークモデルを用いることが妥当である。

また、特に都市部では、都市下水道、側溝や小河川の能力により浸水の状況が規定される場合が多いことから、これらを適切にモデル化する必要がある。更に、地下施設等が存在する場合には、これらもモデル化する必要がある。両者のモデル化についても、1次元ネットワークモデルでは容易に実現可能である。

以上のことを考慮して、本研究では1次元ネットワークモデルを用いた浸水予測モデルを構築することとした。

(4) 1次元ネットワークモデルによるモデル化

1次元ネットワークモデルによる浸水予測計算方法の概要を図-1に示す。

本研究では、既に国内外において多くの使用実績を持つデンマーク水理環境研究所（DHI Water & Environment）の総合都市・下水道解析モデルMOUSEを用いた。MOUSEの特徴である計算安定化のための工夫を次に示す。

管渠粗度系数:0.013, 道路粗度系数:0.020

Figure 1 consists of three main parts. At the top is a topographic map of the study area, showing the coastline, major roads, and various landmarks. Below the map is a scatter plot of actual inundation data, with the y-axis representing elevation in meters (m) ranging from -60,200.0 to -62,000.0. The x-axis represents distance in meters (m) ranging from -20,500.0 to -18,500.0. The actual inundation data is represented by black dots. To the right of the scatter plot is a legend box containing the text '〈シミュレーション結果〉' (Simulation Results) and a black square symbol followed by '20cm 以上の浸水範囲' (Inundation area of 20cm or more). The simulation results are represented by black squares, which are plotted along the same axes as the actual data. The simulation results show a similar trend to the actual data, with inundation occurring at lower elevations and extending further inland.

水位 リンク-30-7-1998 12.28 Merge-11998.PRF

- ・自由表面の連続，運動方程式（サン・ブナン法）を使用
- ・解法は陰型式差分数値解法（6点アボットスキーム）を採用
- ・計算時間間隔を可変として振動を抑制
- ・暗渠の天端に仮想の狭いスロット（プライスマンスロット）を設け，自由表面・圧力流れを同時に表現

1次元のネットワークモデルのモデル化には道路ネットワークのみ、下水道ネットワークのみ、および道路ネットワークと下水道ネットワークを組み合わせた方法の3つのモデル化手法があり、図-3の1次元ネットワークによるモデル化の判断フローに示すように、それぞれ目的に応じて使い分ける必要がある。そこで、本研究ではこれら3つの手法についてモデル化の方法と浸水状況の再現性について検討を行い、以下の結論を得た。^{1), 2)}

- ```

graph TD
 Q1[地先単位の詳細な浸水予測が必要か?] -- Yes --> Q2[対象範囲が自治体全体など広い範囲か?]
 Q1 -- No --> Q3{判断}
 Q2 -- Yes --> Q3
 Q2 -- No --> Q4[下水道管渠データ等がある
又は容易に入手可能か?]
 Q3 -- No --> Q5[下水道能力不足による浸水
状況を把握したいか?]
 Q3 -- Yes --> Q5
 Q5 -- No --> Q6[構築モデル]
 Q5 -- Yes --> Q7[下水道網のみ]
 Q4 -- Yes --> Q8[CPU等の視点から道路・下水道複合モデル化が可能か?]
 Q4 -- No --> Q9[道路網を用い
仮想下水道を構築するか?]
 Q8 -- Yes --> Q9
 Q8 -- No --> Q10[道路網+下水道網
(池的な扱い)]
 Q9 -- No --> Q10
 Q9 -- Yes --> Q11[道路網+下水道網
(道路から仮定)]
 Q12[河川諸元データ等がある
又は容易に入手可能か?] -- Yes --> Q13[河川水位の影響を受け河川網をモデル化する必要があるか?]
 Q12 -- No --> Q14[内水区域]
 Q14 -- No --> Q15[道路網+下水道網]
 Q14 -- Yes --> Q16[地下施設等への浸水現象を表現する必要があるか?]
 Q16 -- Yes --> Q17[道路網+下水道網+地下施設等]
 Q16 -- No --> Q18[自然排水区域]
 Q18 -- No --> Q19[道路網+下水道網+河川網]
 Q18 -- Yes --> Q20[道路網+下水道網+河川網+地下施設等]

```

- 62 -

表-3 福岡市における既往の被害例<sup>3)</sup>

| 資産、経済・社会体制への被害例                                                                                   | 人命への被害例                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ○1973年7月31日水害<br>ビル地下室の水没<br>○1983年9月6日水害<br>停電による交通麻痺<br>銀行オンラインの不通<br>ビル地下への浸水<br>ビル1階の店舗・商店の被害 | ○1999年6月29日水害<br>JR 博多駅周辺地下室で<br>逃げ遅れた人が水死<br>○2003年7月19日水害<br>道路アンダーパス部で車<br>が水没し、逃げ遅れた人<br>が水死 |

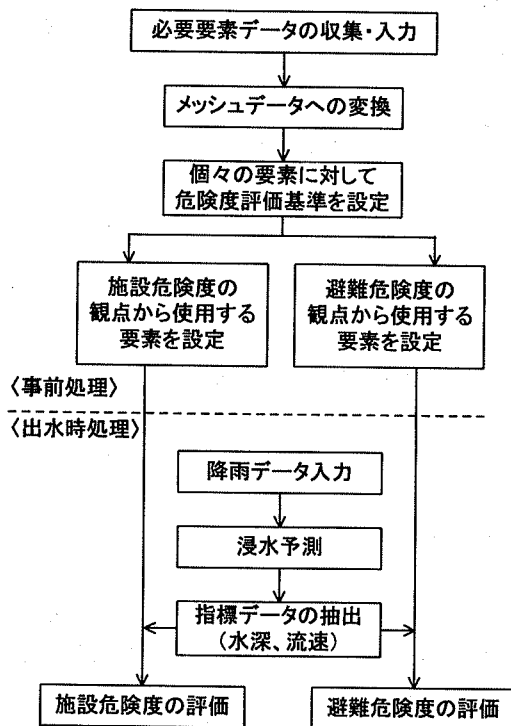


図-4 危険度評価手法の流れ

- ・道路ネットワークのモデル化に加え、下水道管渠をモデル化し下水道能力を考慮することにより浸水予測精度が向上する。
- ・表現したい浸水状況の精度にもよるが、下水道管渠は、管径800～1000mm程度以上の主要幹線、枝線程度をモデル化対象とすることが望ましい。

### (5) 浸水予測結果の面的表示

1次元ネットワークモデルを用いた浸水予測結果を用い危険度評価等を行う場合には、浸水深、氾濫流の流速分布等を平面的に表現する方がわかり易いことから、ここでは浸水深を簡易に平面的に表現する方法の検討を行った。以下に概略を示す。

- ・道路交差点等の浸水位ポイントデータをもとに
  - 1)推定浸水位面メッシュデータを作成(補間)
  - 2)同間隔の地盤高メッシュデータを用意
- ・1)～2)によりメッシュ毎の浸水深を算出

このとき、1次元ネットワークで用いた交差点等の地盤高データと、メッシュ地盤高(例えば25mメッシュの平均地盤高)に差異がある場合には、正しい浸水状況を表現できなくなるため、両者は同一のデータから作成

表-4 危険度評価のための必要情報項目

| 区分    | 要素 0 内は代表的なもの                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 評価指標    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 施設危険度 | 公共機関施設(警察署、自衛隊施設、行政機関庁舎)<br>ライフライン(変電所等電力関連施設、上水道供給施設、下水処理・排水施設、電話・放送等通信施設)<br>避難関連施設(体育施設や学校など二次避難所、防災活動拠点、緊急輸送道路、広域輸送拠点)<br>交通輸送施設(飛行場、ヘリポート、港湾・岸壁・海岸保全施設)<br>災害弱者施設(外国人居住施設)<br>移動困難者施設(高齢者・障害者福祉施設、幼稚園・保育園、病院)<br>地下施設入り口(地下駅入り口、地下高速進入ランプ、地下街、地下駐車場、ビルまたは家屋地階入り口)<br>容易浸水地点(アンダーパス、地形上の凹地) | 水深      |
|       | 重要防災施設(高圧ガス施設、化学薬品取り扱い施設)<br>木造建築の地上部                                                                                                                                                                                                                                                           | 水深 + 流速 |
|       | 建造物ではない人工物<br>渋滞しやすい道路のアンダーパス<br>道路のU型側溝(蓋が無い・損傷・遺失している部位)<br>マンホール<br>用水路                                                                                                                                                                                                                      | 水深      |
|       | 自然地形<br>地形上の凹地<br>傾斜地                                                                                                                                                                                                                                                                           | 水深 + 流速 |
| 避難危険度 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |         |

表-5 危険度評価基準の設定例

| 区分     | ランク                                                   |
|--------|-------------------------------------------------------|
| 公共機関施設 | 1 水深 10～20cm                                          |
|        | 2 水深 20～30cm                                          |
|        | 3 水深 30～60cm                                          |
|        | 4 水深 60cm 以上                                          |
| 地下鉄入口  | 1 水深 15cm 未満かつ流速 0.5m/s 未満                            |
|        | 2 水深 15～30cm 又は流速 0.5～1.0m/s                          |
|        | 3 水深 15～30cm かつ流速 0.5～1.0m/s、水深 30cm 以上又は流速 1.0m/s 以上 |
|        | 4 水深 30cm 以上かつ流速 1.0m/s 以上                            |

する必要がある。

## 3. 浸水による危険度評価手法の検討<sup>4), 5)</sup>

### (1) 浸水による危険度評価の考え方

一般に浸水被害は、床上浸水などによる家財道具や家屋など資産への直接的な被害、経済・社会活動への被害、マンホールへの転落や地下室から逃げ遅れた事による水死など人命への被害に大別される。例えば、たびたび水害に見舞われている福岡市の場合、資産、経済・社会体制や人命に関する被害として表3のような事例が報告されている。

資産、経済・社会活動の被害は、移動できない何らかの物(＝施設)が浸水することで直接または間接的に被害を受けるものであり、人命への被害は避難が出来なかった、または間に合わなかったことによって発生する。

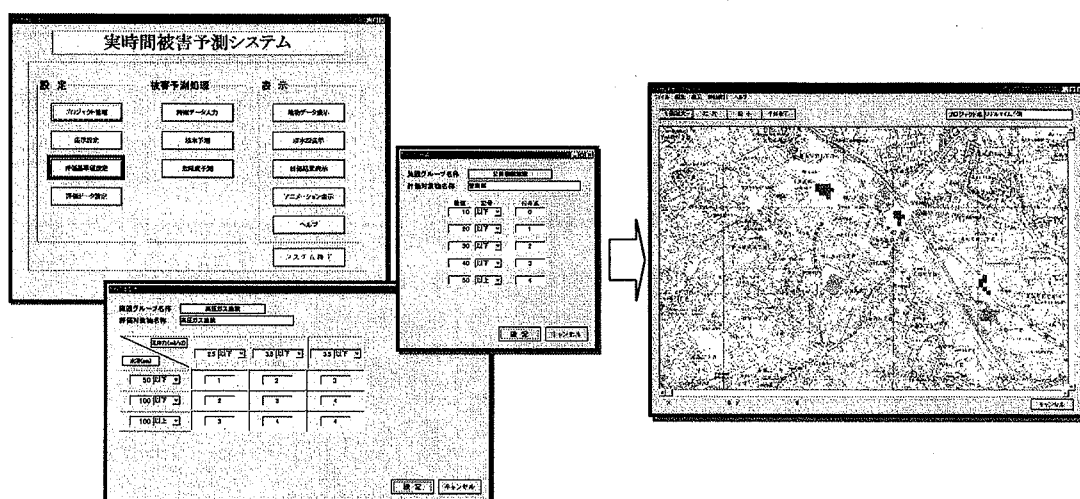


図-5 危険度評価システム（プロトタイプ）のイメージ

すなわち、1)移動できない施設の危険度（浸水により災害が発生するかどうか）と、2)移動可能な人に関する危険度（安全に避難できるかどうか）は、異なった指標で評価する必要がある。

よってここでは両者を区分し、各々の危険度評価方法を検討した。

浸水による危険度評価方法の概略の流れを図-4に示す。被害対象となる地物等の要素をメッシュ単位で持ち、これとシミュレーションにより得られた浸水深、流速データと重ね合わせることで危険度の変化を経時的に評価するものである。本手法の主な検討事項を以下に示す。（個々の要素のメッシュ化）

- ・施設および避難に対する危険性を評価するための基礎情報を収集・整理し、これらを適切なサイズ（5～10cm）でメッシュ化
- ・各要素毎に適用する指標と評価基準を設定（個別危険度の算出）
- ・浸水深等の指標の値に応じた危険度を点数付け（総合危険度の算出）
- ・施設、避難の2つの観点から、評価に必要な要素を選択し、重み付け平均・最大値等により総合危険度を算出（危険度評価に用いる指標）
- ・浸水深
- ・流速
- ・流体力（=水深×流速<sup>2</sup>）

## (2) 危険度評価のための情報項目（要素）

危険度評価に際し、必要となる情報項目（要素）および危険度評価する際の指標を表-4に示す。本データの多くは、例えばゼンリンZmapTOWNⅡなどの市販電子地図等から入手が可能である。また、表-5に危険度評価基準の設定を例示する。

## (3) 危険度評価システムの構築

上述の検討結果をもとに、危険度評価システム（プロトタイプ）を構築した。システムイメージを図-5に示す。

## 4. まとめ

本研究は、簡易な浸水予測手法ならびに洪水時の危険度評価手法について検討を行い、以下の点を明らかにした。

- ・モデル化手法：主要幹線の下水道網モデルと道路網モデルを組み合わせた方法が、最も実績に近い浸水予測結果が得られる。
- ・危険度評価：単に洪水時の浸水深だけでなく、道路網の流速等を指標として加え、道路等を通過する人や車など避難危険度、建物等施設の被害危険度の両方を評価する必要がある。

今後は、本危険度評価手法を実流域に適用し、実時間危険度予測のため必要なデータの精度、設定した危険度指標、ランク分け方法の妥当性について検討を行い、望ましい危険度評価方法等を明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- 1) 中根和郎、藤原直樹：都市域における実時間浸水予測の検討、第21回日本自然災害学会学術講演会、2002。
- 2) 中根和郎、藤原直樹：道路網を用いた都市域における実時間浸水予測、第22回日本自然災害学会学術講演会、2003。
- 3) 平野宗夫：近年の九州豪雨災害に関する、講演会資料、2003
- 4) 鳥居謙一・加藤史訓：高潮氾濫の危険度評価、国総研アニュアルレポート 2003,p12-14
- 5) 建設省都市局都市防災対策室監修・（株）ぎょうせい発行：都市防災実務ハンドブック地震防災編、1997

（2004. 4. 7受付）