

平成23年度

氾濫計算モデルの高度化について

—豊平川左岸部における氾濫計算—

札幌開発建設部 河川計画課 ○遠藤 和章
石田 時代
鈴木 史郎

札幌市を貫流する豊平川は、ひとたび大規模水害が発生すると、扇状地を流れの速い洪水氾濫流が流下して短時間で都市部に到達し、甚大な被害の発生が想定される。しかし、従来の氾濫計算モデルは、建物を粗度として扱っており、高度な土地利用が行われている豊平川流域の特徴的な洪水氾濫現象を十分に表現できていない可能性がある。

本検討では、今までに整備された航空レーザ測量による詳細な地盤高データを用い、豊平川左岸部を対象として、ビル等の建物の影響を考慮した氾濫計算モデルの高度化を図り、再現性を向上させることを目的として検討を実施したものである。

キーワード：氾濫計算

1. はじめに

市街地では、ビル等の建物により氾濫流が阻害され、道路等に流れが集中する。特に、扇状地では氾濫流の流速が速く、建物による水位上昇や道路等における高速流の発生がより顕著となる。扇状地の市街地において、これらの建物による水位上昇や高速流の発生などを精度よく予測することは、洪水危機管理のために重要である。そのため、扇状地の密集市街地における氾濫解析では、低平地に比べて地盤の勾配や建物の影響を適切に表現することが課題である。

これまで浸水想定区域図作成などに一般的に用いられている氾濫解析手法¹⁾²⁾では、建物による影響を建物占有率によって粗度係数に反映し表現してきた。しかし、これらの手法では概略の浸水範囲を把握することはできるが、建物や道路の影響を取り扱うには不向きであることが川池ら³⁾によって報告されている。

都市部の洪水氾濫に関する研究（例えば、福岡ら⁴⁾井上ら⁵⁾）も数多く存在し、様々な手法の有用性が示されているが、氾濫現象は検証に用いることのできる実績データが無いことや、模型実験も大型化しやすいため精度検証例は極めて少なく、大型模型実験による氾濫解析の精度検証は中川らの研究⁶⁾など僅かである。

本稿では、航空レーザ測量による詳細な地盤高データ及び豊平川左岸部扇状地を対象に実施された大型氾濫模型実験⁷⁾結果を用いて氾濫解析手法を検証し、メッシュの大きさやメッシュの形状が氾濫流に与える影響につい

て検証した。また、急流河川の扇状地に発達した密集市街地において最適な氾濫解析手法について比較検討した。さらに、詳細な建物形状データを使用してビル等の配置をより正確に表現した場合の再現性についても確認した。

2. 豊平川左岸の氾濫流の特徴

豊平川左岸の氾濫流の特徴について、過去に実施された豊平川左岸氾濫模型実験からその特徴を説明する。この氾濫模型実験は、平成11年度に開発土木研究所（現・寒地土木研究所）によって実施されたものである。実験⁷⁾の概要を表-1に示す。この模型実験は豊平川氾濫による札幌市中心部の氾濫流況を把握するために大型模型を用いて実施されたものである。（写真-1）

表-1 豊平川左岸氾濫模型実験の概要

項目	概要
実施年度	平成11年度
実施主体	北海道開発局開発土木研究所
対象範囲	豊平川および豊平川左岸（札幌中心部付近）
縮尺・面積	S=1/50, 4,845m ² （現地12.1km ² ）
建物	レンガ(210×200×60mm)により建物を再現 街区毎の建物占有率より間隔を調整
破堤条件	幌平橋下流左岸破堤、氾濫流量Q=77l/s一定



写真-1 H11 豊平川氾濫模型実験の様子



図-1 模型実験地盤高

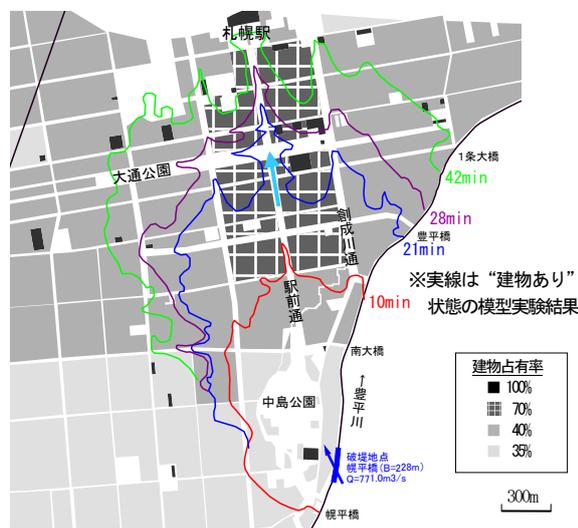


図-2 建物占有率の分布と模型実験結果

図-1に模型実験の地盤高コンターを示す。参考として、建物がない場合の数値解析の浸水範囲を示した。破堤地点から札幌駅を結ぶ駅前通の地盤が高いため、氾濫流は図中の水色矢印で示す地形に沿った流れとなる。

図-2には建物を配置した状態での模型実験結果を示した。建物を配置することによって、破堤地点から札幌駅に向けた駅前通を流下する流れが明確に現れている。

このように、扇状地に発達した密集市街地を流下する氾濫流の特徴として、建物による通水障害によって道路に流れが集中し、道路を中心に氾濫流が高速で流下することが挙げられる。

3. 氾濫計算の現状と課題

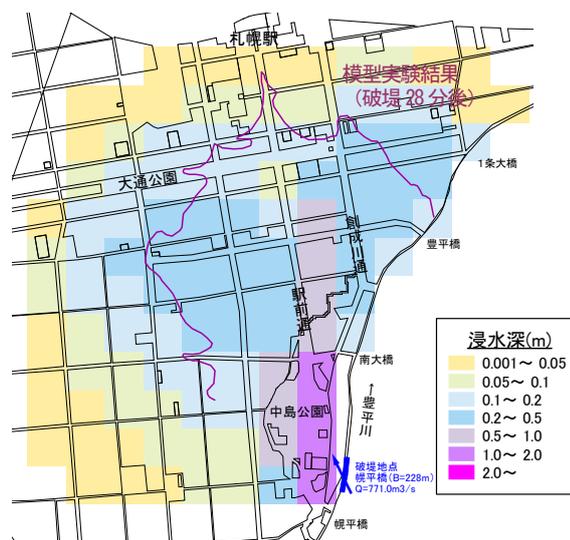
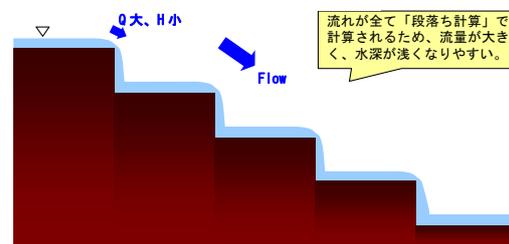


図-3 従来モデルの検証結果(矩形250mメッシュ)

(a) メッシュサイズが大きい場合



(b) メッシュサイズが小さい場合

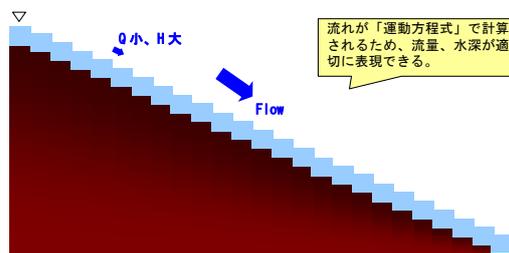


図-4 メッシュサイズによる流れの違い

従来モデル(矩形250mメッシュ)での解析結果と模型実験結果の比較を図-3に示す。従来モデルでは、浸水範囲が大きく拡散し、浸水深も極めて浅くなっていた。この原因はメッシュ間の高低差が過大なときに生じる「段落ち計算」の影響である。水理公式集⁸⁾などに示されている一般的な氾濫解析では、下流側メッシュの水位が低い(当該メッシュの地盤高+水深の2/3以下)場合、限界水深を仮定してメッシュ間流量を算出している。そのため、氾濫原の勾配が大きい場合、図-4(a)に示すようにメッシュサイズが過大であると、多くのメッシュで段落ち計算となる。段落ち計算になると限界流量を与えるため、メッシュ間流量が理論上最大となり、図-3のように氾濫水が浅く広く拡がる。

また、氾濫水が高速で流下する道路を連続的に表現できていないことが精度低下の原因となっていた。

4. 氾濫計算モデルの改良

ここでは、扇状地の密集市街地における氾濫現象を精度よく再現するために、まず、矩形格子計算におけるメッシュサイズの影響について感度分析を行った。次に、建物の影響を表現する手法を検討した。さらに、非構造格子を用いた場合の再現性について確認した。

(1) メッシュサイズによる氾濫特性の比較

250m、50m、10m の3つのメッシュサイズで氾濫シミュレーションを行い、氾濫特性を比較した。解析条件は表-2 に示すとおり、模型実験時の値に合わせて設定した。

浸水範囲の比較を図-5 に示す。ここでは、模型実験において駅前通を流下する傾向が顕著に現れている破堤開始から28分後の結果を用いて比較する。250mメッシュでは浸水範囲が模型実験結果と大きく乖離している。また浸水深についても50mメッシュや10mメッシュの場合に比べて小さい。

表-2 氾濫解析条件

項目	条件
分割方法	国土基本図郭 2500 を基本に、対象メッシュサイズに分割
メッシュ数	250m : 238mesh, 50m : 4,879mesh 10m : 114,949mesh
地盤高	模型実験地盤高を再現
建物占有率	10mメッシュについて模型実験に併せて設定し、50mと250mメッシュは10mメッシュ値を平均して設定
粗度係数	模型実験がモルタル仕上で行われているため $n=0.020$ を設定
初期条件	破堤10分後の浸水範囲を初期条件とした

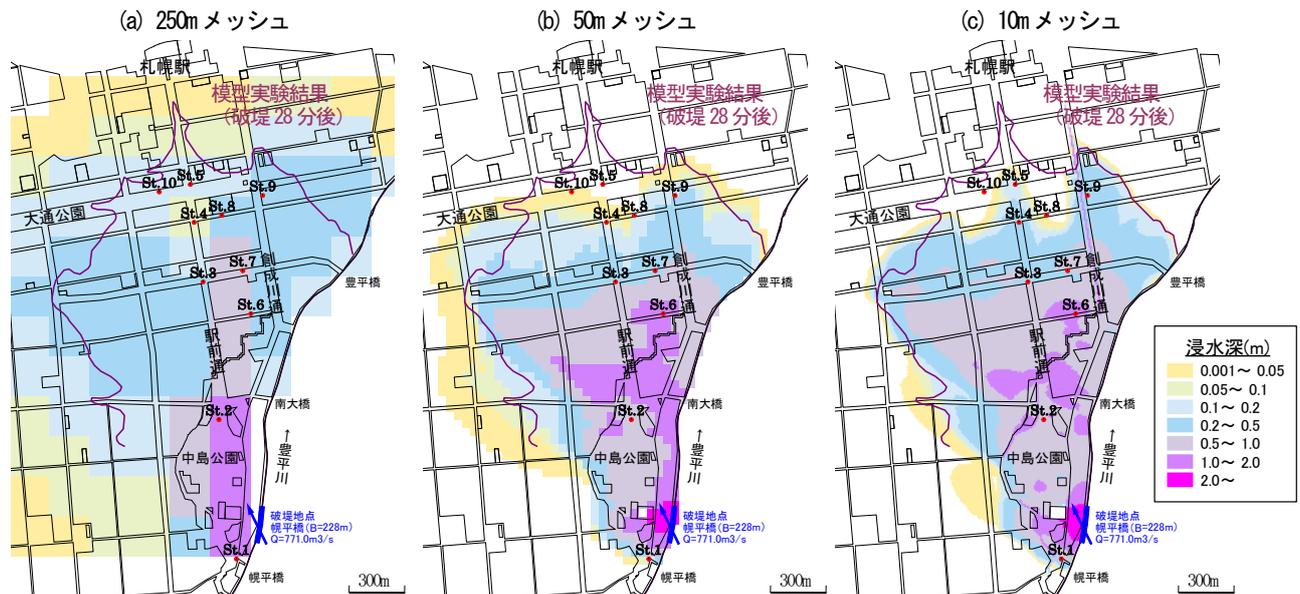


図-5 メッシュサイズによる浸水範囲の比較 (28分後)

50m、10mメッシュでは250mメッシュのような浸水範囲の広がりは抑えられているものの、駅前通に集中する流れについては、50mメッシュでは表現できていない。また、10mメッシュでは建物用地と道路用地が明確に区分できているため駅前通を流下する流れが現れているが、それでも模型実験結果に比べると流下距離が短い。

図-6 に定常状態となった破堤から2時間後の模型実験と解析結果の浸水深の比較を示す。地点位置は図-7 中に併せて示している。段落ち計算となる250mメッシュでは実験値の浸水深より大幅に小さい地点が多くみられる。また、50mや10mメッシュでも実験値より浸水深が小さい地点が多く、十分な再現性は得られていない。

(2) 建物の影響を表現する手法の検討

上記検討において、浸水深が実験結果に比べ過小に計算される結果となっていた。これは、一般的な連続式(1)式では、コントロールボリューム内の建物容積(非浸水空間)を考慮していないことと、建物による通水障害を考慮していないことの2点によるものである。そこで、(2)式に示すように連続式を考慮して、建物の影響を考慮することとした。

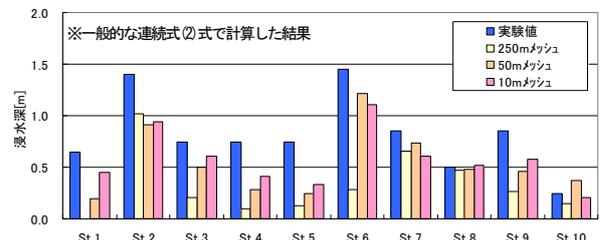


図-6 メッシュサイズごとの浸水深比較 (2時間後)

一般的な連続式³⁾

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

建物を考慮した連続式

$$(1-\theta) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \lambda M}{\partial x} + \frac{\partial \lambda N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

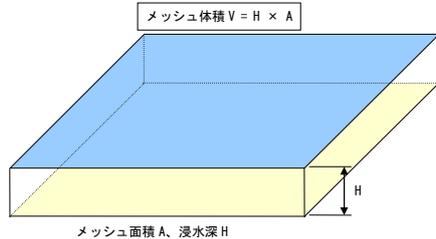
ここで、 θ : 建物占有率 [-]

λ : 透過率 [-] ($\cong 1 - \sqrt{\theta}$)

h : 水位 [m]

M, N : 単位幅当りの流量フラックス [m^2/s]

1) 通常の場合 (建物も浸水)



2) 非浸水エリアを考慮 (建物は浸水しない) 非浸水エリアを考慮したメッシュ体積

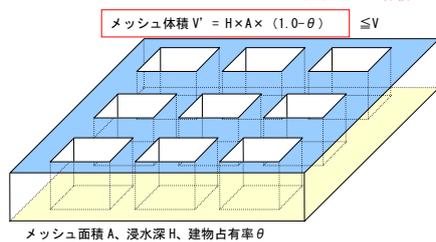


図-7 非浸水エリアの考え方

(2)式の左辺第一項の $(1-\theta)$ は、図-7に示すように建物による浸水しない面積(非浸水エリア)を考慮するため、メッシュ面積あたりの建物以外の用地の比率を建物占有率を用いて表したものである。左辺第二項、第三項の λ は、建物による通水障害を示すためのもので、これも図-8に示すように建物占有率から簡易的に $\lambda = 1 - \sqrt{\theta}$ (ここで $\bar{\theta}$ は隣接メッシュとの平均値)として与えた。

5. 氾濫計算結果の検証

(1) 矩形格子による模型実験の再現

解析結果から浸水範囲を図-9(a)、(b)に示す。50mメッシュでは連続式を変更しても模型実験結果との乖離が大きいが、メッシュサイズを10mまで細かくすることにより実験結果を良好に再現できている。これは、メッシュサイズを道路幅より小さくすることにより、建物の無い道路を連続的に表現できたためである。

また、流速分布を図-10(a)、(b)に示す。(a)矩形格子

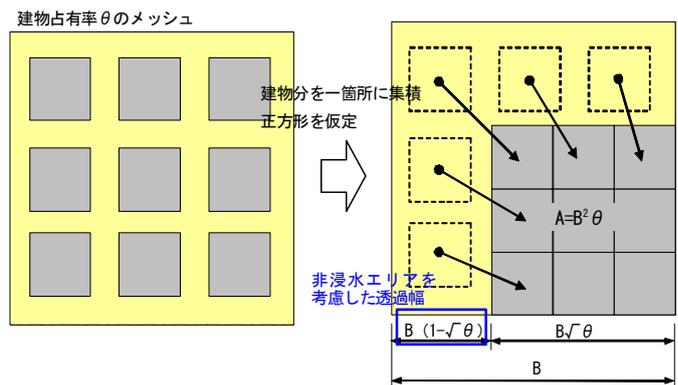


図-8 透過率の考え方

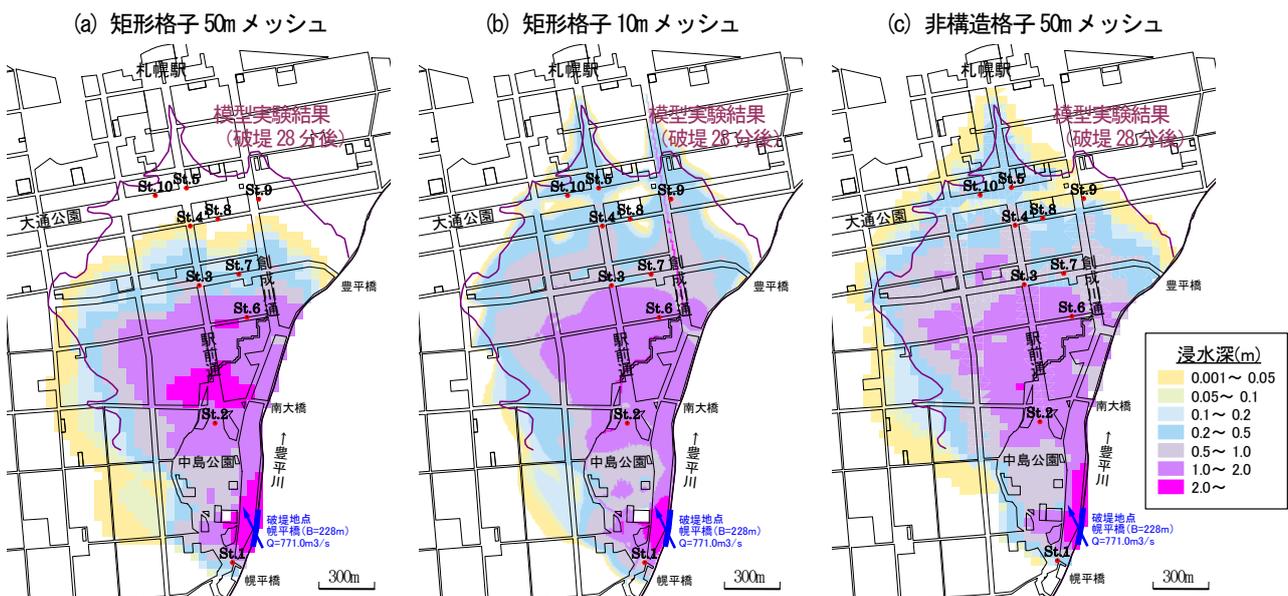


図-9 連続式に建物の影響を考慮した場合の浸水範囲の比較 (28分後)

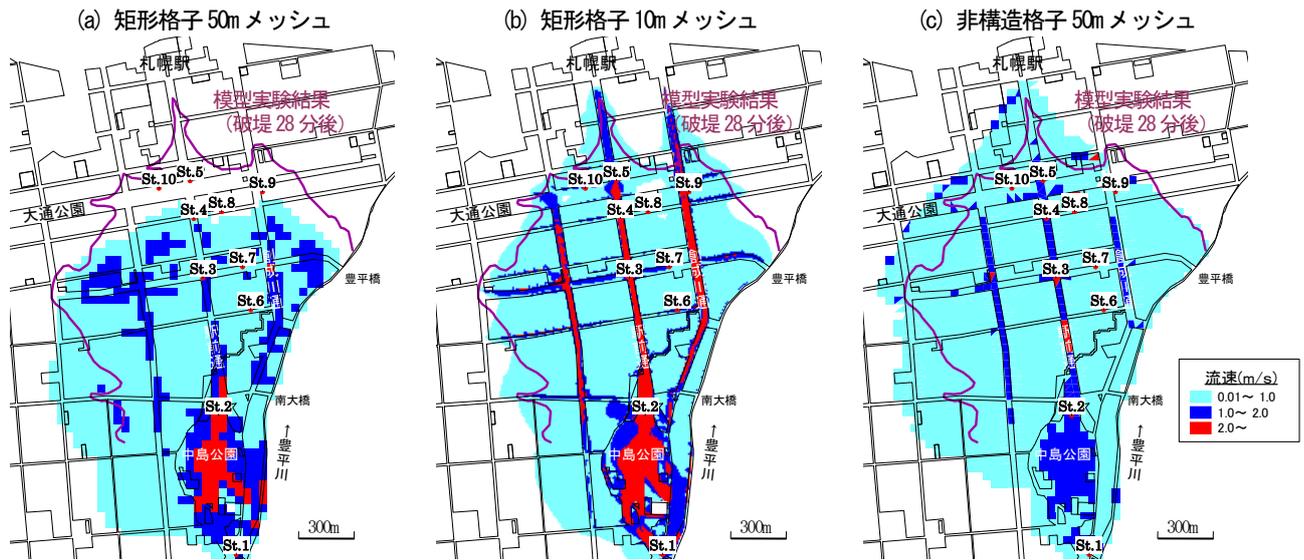


図-10 連続的に建物の影響を考慮した場合の流速分布の比較 (28分後)

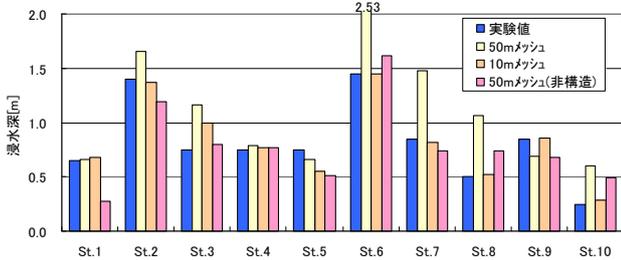


図-11 メッシュ分割別の浸水深比較 (2時間後)

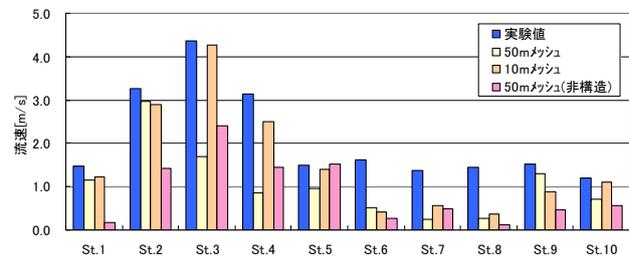


図-12 メッシュ分割別の流速比較 (2時間後)

50m メッシュでは駅前通り、創成川通りなど大きな通りを流下する流れが表現できていない。(b)矩形格子10mメッシュではこれらの大きな通りを流下する2.0m/sを超える範囲が表現できている。

(2) 非構造格子による模型実験の再現

メッシュ形状の影響を把握するため、非構造格子メッシュによるシミュレーションを行った。非構造格子は川池ら³⁾により、市街地の氾濫予測精度向上に有効であることが示されているが、道路や建物に沿ったメッシュの構築に労力を要するなどの問題もある。ここでは、駅前通などの主要道路は道路線形に合わせたメッシュ形状とし、それ以外は50mの矩形格子とした。連続式は(2)式を用い建物の影響を考慮している。

結果から浸水範囲を図-9(c)に示す。実験結果を概ね再現できている。これは道路と建物の境界でメッシュを分割することにより、建物の無い道路を連続的に表現できているためである。

各手法による浸水深と流速の比較を図-11、図-12に示す。浸水範囲を概ね再現できていた矩形格子10mメッシュと非構造格子50mメッシュでは、浸水深も概ね再現できている。流速についてみると、10mメッシュでは大きな通り(St.2~St.5)については模型実験とほぼ同等な

値が得られている。それに対し、非構造格子50mメッシュでは、道路上の流れが平均化されてしまうため、高流速が発生する範囲が表現できず、実験値に比べて大幅に小さい値となっている。

以上のことから、矩形格子10mメッシュの再現性が良いことが確認された。

(3) 実際の地盤高データ及び建物配置による再現計算

上記より再現性については確認できたため、実現象を再現するため航空レーザ測量より算出した地盤高データより作成した矩形格子10mメッシュモデルと非構造格子50mメッシュモデルを用いて、実際の建物配置に合わせて建物占有率を設定した場合についても比較した。ここで、矩形格子10mメッシュでは、主要な通りだけではなく幅20m程度の中通りまで連続的に表現できているが、非構造格子50mメッシュになるとメッシュ分割に考慮した大きな通りは表現できるものの、中通りについては平均化されてしまうため全く表現できていない。

解析結果を図-13に示す。まず、中通りが表現できている図-13(b)の矩形格子10mメッシュについてみると、実模型実験でみられたような駅前通を流下する流れは小さくなった。これは、模型実験が一律に建物の間隔を設定し大きな道路と間隔の狭い建物用地が明確化している

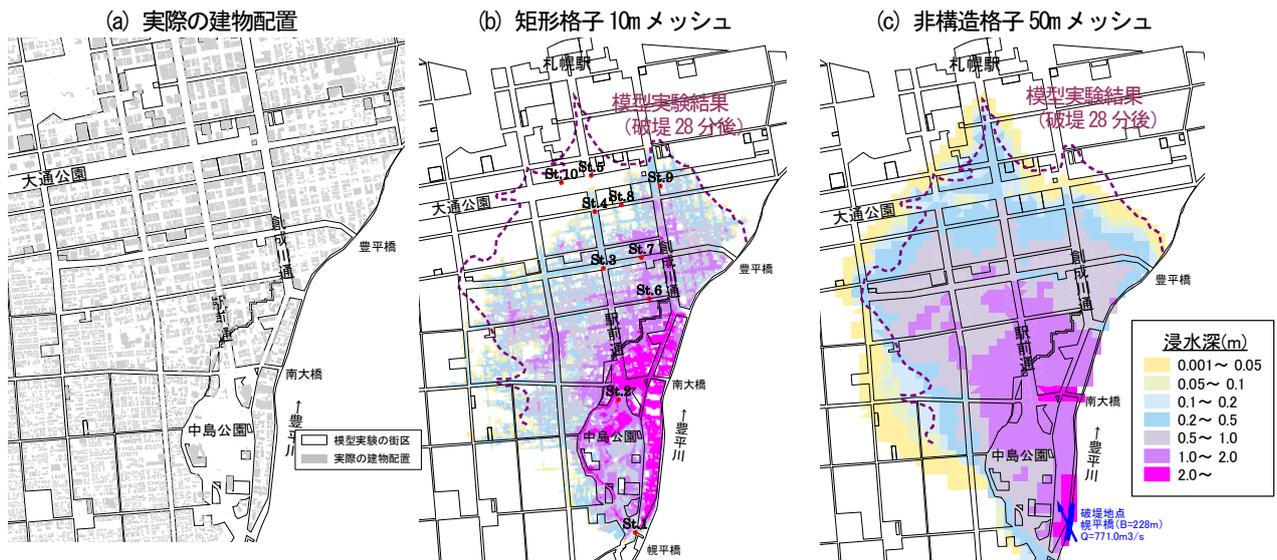


図-13 実際の建物配置による解析手法の比較 (28分後)

のに対し、実際には大小様々な大きさの道路が混在しており、大きな道路だけではなく、中通りなどの影響も無視できないためである。図-13(c)の非構造格子 50m メッシュについてみると、中通りが表現できていないため、模型実験結果とほぼ同じ浸水範囲になっている。

つまり、実際の建物配置による氾濫解析では、非構造格子においても中小の道路を表現する必要がある。しかしながら、非構造格子で構築する場合、どの規模の道路までモデル上で表現するべきか判断が困難である。また、非構造格子においてそのような中小の道路までメッシュを細分化するためには多大な労力が必要となる。

これらのことから、実際の建物配置による氾濫解析を精度良く行うためには、非構造格子に比べ矩形格子を用いてメッシュサイズをできるだけ小さくし、中小の道路までの的確に表現することが比較的容易に再現できる手法である。

6. おわりに

扇状地に発達した密集市街地の氾濫解析を実施するにあたって、以下の知見を得た。

- 扇状地の急勾配の氾濫原では、氾濫解析において「段落ち計算」が生じないような詳細なメッシュサイズを採用する必要がある(勾配 $I=1/200$ で 50m メッシュ以下⁹⁾)。また、中小の通りを流下する流れや高流速が生じている範囲を特定するためには、さらに詳細なメッシュサイズを採用することが望ましい。
- 建物の影響を考慮した連続式(2)式を適用することによって、建物による水位上昇や道路へ集中する流れを表現できるようになる。

今回示した連続式に建物の影響を取り込むなどの手法は、急流河川だけでなく低平地河川でも適用でき、建

物による流れの集中を表現することができる。

今後、豊平川左岸(札幌市中心部)において、このモデルを使用した水災害リスクの評価を行っていく。

謝辞: 本検討にあたっては、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所から貴重なデータのご提供およびご助言をいただいた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 国土交通省河川局治水課: 浸水想定区域図作成マニュアル、2005. 6.
- 栗城稔、末次忠司、海野仁、田中義人、小林裕明: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案)、建設省土木研究所 河川部都市河川研究室、1996. 2.
- 川池健司、井上和也、林秀樹、戸田圭一: 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. 2.
- 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策の研究、土木学会論文集、No. 600/II-44、pp. 23-36、1998.
- 井上和也、川池健司、林秀樹: 都市域における氾濫解析モデルに関する研究、水工学論文集、第43巻、pp. 533-538、1999. 2.
- 中川一ら: 住区内での浸水を考慮した洪水氾濫の実験と解析、京都大学防災研究所年報 第47号B、pp. 517-526、2004.
- 北海道開発局開発土木研究所、株式会社水工リサーチ: 平成11年度施行豊平川氾濫模型実験業務報告書、2000. 3.
- 土木学会: 水理公式集例題プログラム集、平成13年版、河川編。
- 三浦心、川村育男、木村一郎、三浦敦禎: 「扇状地に発達した密集市街地における氾濫解析手法に関する検討」、水工学論文集、第55巻、2011. 2.