

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻修士論文
令和4年2月



Master's Thesis
Department of Civil and Earth Resources Engineering
Graduate School of Engineering
Kyoto University
February 2022

建物浸水を考慮した洪水氾濫解析モデルの実験的検証
—実都市の建物配置を適用して—

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻
防災工学講座 防災水工学分野
藤森 健人

論文要旨

本研究では、市街地での氾濫において建物への浸水は時間をかけて生じるものという前提の下、実際の市街地を模した領域で氾濫実験と氾濫解析を行った。その実験結果と解析計算結果を比較することで、解析モデルの妥当性を評価することを目的とする。

氾濫実験には、実際の建物配置に基づいて作成した市街地模型を用いた。配置した建物模型に穴を開けることで建物への浸水の表現を試みた。結果として、流量が小さいケースでは氾濫流が広がる過程で上流の一部の建物模型が浸水し、流量が大きいケースでは下流の建物模型も浸水した。また、道に沿って流下する流れが大きくなる様子が確認された。

実験で用いた市街地領域を対象とした氾濫解析には境界浸水モデル・国交省モデル・格子内浸水モデルの3手法を用いた。境界浸水モデルは非構造格子を用いた氾濫解析手法で、建物の壁面と格子辺を一致させて、その建物境界ではトリチェリの定理を適用することで建物浸水を表現するモデルである。国交省モデルは国土交通省が発行している「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）」に示されている構造格子を用いた標準的な手法である。建物の存在は格子に空隙率と抗力係数を与えることで考慮されている。格子内浸水モデルは構造格子の各格子内に仮定の建物を仮定し、格子内で建物内への浸水を考慮するモデルである。

解析計算の結果、いずれのケースでも大きな道に沿って流下する挙動は確認された。しかし、実験の氾濫域や水深と詳細に照らし合わせると実験を完全に再現する結果とはならなかったが、それは実験の場では氾濫水が勾配や表面張力の影響を強く受けるためだと考えた。

次に解析モデルどうしの比較の結果、国交省モデルよりも格子内浸水モデルの方が、建物の存在によって格子面積が小さく扱われるため、氾濫流が道路に沿って流れる傾向をより強く捉えていることが分かった。また、境界浸水モデルは建物の形状までを取り入れて計算を行えるが、格子数に鑑みるに実用性のある手法とは言えない。ただし、格子分割が細かいと建物配置や道路の存在を詳細に表現できることは国交省モデルと格子内浸水モデルを2通りの格子に適用した計算結果によって示された。

今後の課題として、格子内浸水モデルで用いた浸入口に関するパラメータの検討、対象領域の拡大・変更、その場合の妥当性評価が課題として挙げられる。

目次

第1章 序論	1
第2章 氾濫実験	4
2.1 実験模型の概要	4
2.1.1 氾濫台の概要	4
2.1.2 建物配置の検討	5
2.1.3 建物への浸水過程の表現.....	8
2.1.4 市街地領域の作成.....	10
2.2 氾濫実験の概要	11
2.2.1 計測項目・手法	11
2.2.2 実験条件	13
2.3 実験結果.....	14
第3章 氾濫解析	20
3.1 境界浸水モデル	20
3.1.1 対象領域の格子分割	20
3.1.2 計算手法	21
3.2 国交省モデル.....	23
3.2.1 対象領域の格子分割	23
3.2.2 計算手法	24
3.3 格子内浸水モデル.....	25
3.3.1 対象領域の格子分割	25
3.3.2 計算手法	25
3.4 計算条件.....	27
3.5 計算結果.....	28
3.5.1 境界浸水モデル	28
3.5.2 国交省モデル	28

3.5.3 格子内浸水モデル.....	29
第4章 考察.....	53
4.1 実験と境界浸水モデルの比較.....	61
4.2 実験と国交省モデル・格子内浸水モデルの比較.....	62
4.2.1 国交省モデルと格子内浸水モデルの比較.....	62
4.2.2 格子サイズに関する考察.....	64
4.2.3 実験との比較.....	64
4.3 汎濫解析手法のまとめ.....	66
第5章 結論.....	67
参考文献.....	68
謝辞.....	70

第 1 章 序論

近代以前より、わが国では洪水氾濫の防止・軽減を目的とした治水事業が行われてきたが、現代においても治水の必要性は依然として高い状態にある。近代以降の経済成長の過程において山地や森林が開発され、流域の保水・遊水機能が失われたため、洪水時の河川流量の増大を招き、水害の危険性は上昇してしまった。また、治水対策により被害が減少するほど、氾濫原に都市の中核機能や住宅が集積するようになり、万が一都市部で洪水氾濫が発生した場合の被害は甚大なものになると予想される¹⁾。

また、洪水を引き起こす主な要因として挙げられるのが降水である。IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）の第 5 次評価報告書では、中緯度の陸域のほとんどで極端な降水がより強くより頻繁となる可能性が非常に高いことが示されている。事実、1 時間降雨量 50mm 以上の年間発生件数は増加傾向にあり、1976 年～1985 年の平均件数と比して 2008 年～2017 年の平均件数は約 1.4 倍になっている。また、年間に氾濫危険水位を超過した河川の数も増加傾向にある。つまり、今後多くの河川において、現在の対策の想定を超える降水が発生する可能性は高まっており、それによって氾濫を引き起こされることが懸念される²⁾³⁾。

河川洪水による氾濫被害を防止・軽減するためには、堤防のかさ上げや護岸といったハード対策に加え、氾濫発生時の浸水深や避難情報を示した洪水ハザードマップ等のソフト対策も肝要である。水防法では、洪水浸水想定区域内にある市町村に対して、避難の方法等をハザードマップにより周知することが義務付けられている。その作成にあたっては氾濫解析が必須であるが、その数値解析は統一した基準の下で行われる必要があることから、国土交通省は「浸水想定区域図作成マニュアル」を公表した。このマニュアルは幾度かの改訂が行われており、平成 27 年には水防法の改正に対応するために改訂され「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）」（以下「国交省マニュアル」と称する）⁴⁾として公表された。

さて、二次元氾濫解析にはいくつかの手法が存在し、適用対象の特性に応じて適切に選択し活用する必要がある。特に、建物が密集している場においては、道路に沿った氾濫水の流れや建物による氾濫流の遮断等、建物が氾濫水の挙動に与える影響は非常に大きい。そのため、建物の存在を的確に表現できるような格子分割および解析計算手法の重要性は高い。そこで、以下に既往の研究および国交省マニュアルで用いられている格子分割や解析計算手法を示し、それらの課題を踏まえて本研究の目的を記す。

国交省マニュアルの提示している手法では、対象領域をデカルト座標系に沿った矩形格子に分割した計算メッシュを用いている。川池⁵⁾は、このようなデカルト座標系による氾濫解析は格子分割に要する労力が少ないが、建物や道路が同一の格子内に混在す

るため、建物等の影響を考慮するのは不可能だとしている。また、複雑な道路網や地形を扱う際には非構造格子を用いた氾濫解析手法を適用することが望ましいとも述べている。しかし、どの手法をとっても、計算において建物の存在は占有率（格子面積における建物面積の割合）を適用することで扱われるのみであり、建物の外から内に氾濫水が時間をかけて流入する過程は考えられていない。

三浦ら⁶⁾も同様に、占有率を基礎式に適用する手法を用いて氾濫解析を行った。この氾濫解析手法が国交省マニュアルに示されている標準的な手法となる。この手法でも建物の外から内への時間をかけた浸水は考慮されていない。三浦らは併せて過去の氾濫実験を引用することで氾濫解析手法の検証を試みているが、その実験では建物は非浸水のレンガで表現されており、建物への浸水をモデル上でどのように扱っていくのかを課題として挙げている。

福岡ら⁷⁾は氾濫実験と数値解析によって密集市街地による抵抗を粗度係数で表現することを試み、道路・建物の占有率に応じて粗度係数を与えることで氾濫実験を再現できることを示した。ただし、福岡らの氾濫実験において建物は目の粗いスポンジで表現されており、建物浸水のメカニズムに関しては検証の余地があると考えられる。また、氾濫解析には一般曲線座標が用いられたが、データ作成の手間や計算時間といった課題が存在するため、大きな氾濫域での解析には必ずしも最適な方法ではないと述べられている。

赤穂ら⁸⁾は氾濫実験と数値解析の比較によって建物群の空隙率の設定方法について検討を行い、氾濫水の挙動は建物配置による影響が大きく、平均空隙率のみで流況を再現するのは困難であるとした。また、計算格子ごとに空隙率を与える手法を用いることで建物配置による氾濫水挙動への影響を考慮することができると述べている。ただし、赤穂らの研究では建物は非浸水として扱われた。

小内ら⁹⁾は空隙率の異方性が氾濫流に与える影響について、模型実験及び氾濫解析を行い、平均空隙率を考慮した基礎方程式で抗力係数を調整することである程度の再現ができることを示した。ただし、家屋背後へ氾濫流が回り込む現象は再現できなかったとした。また、小内らの研究も建物は非浸水として扱われた。

阿部ら¹⁰⁾は庄内川の流域を対象として構造格子を用いて氾濫解析を行った。阿部らは建物内への浸水を考慮するために国土地理院の建物データから対象領域内にある建物の辺を抽出し、建物の辺で越流公式を用いることで建物内への浸水を表現することを試みた。その結果、建物への流入・流出を考慮することによって、建物が多い地域では陸域の浸水深は小さくなり、また浸水の拡がりに遅れが生じたと結論付けた。しかし、これはあくまでも計算結果のみであるため、今後の課題として観測結果と比較するなどの定量的な流れに関する妥当性の検証を挙げている。

ところで、建物への浸水に着目した例として、桑村ら¹¹⁾はひとつの家屋の屋外が浸

水した場合を想定し、建具を含んだ家屋外周壁の浸水性能を調べる試験方法を考案した。屋外浸水深と屋内への流入量を連続的に測定することによって、浸水経路となる浸水口の面積と高さ位置を推定できることを示した。

そして藤森ら¹²⁾は桑村らの結果を参考にし、市街地氾濫の過程で建物の外が浸水した際に建物の内部に徐々に時間をかけて浸水する現象を表現した解析モデルを提示した。その解析モデルを架空の市街地に適用し、国交省マニュアルの手法を用いた場合と比較した結果、建物への浸水が遅れる影響により最大浸水深や浸水域が大きくなることを示している。ただし、この解析モデルはデカルト座標系に沿った矩形格子を用いており、建物の外周が格子辺と一致している条件でしか適用できないため、今後の改良を必要としている。また、解析モデルの市街地への適用を試みてはいるが、実験との比較は行っていないため実用性は不透明だといえる。

そこで本研究では、まず具体的な建物配置の市街地模型を作成し、配置する建物模型には穴を開けて建物内部への浸水を表現した氾濫実験を行う。その後、実験の市街地模型を対象とし、建物の扱い方や格子分割の異なる3つの氾濫解析手法を用いて数値解析を行う。具体的には、藤森らのモデルを非構造格子に対応させたモデル、国交省マニュアルに記載されている構造格子を用いた標準的なモデル、建物への流入・流出を格子内で簡潔に考慮したモデルの3つである。これらのモデルを用いて氾濫解析を実行し、時刻ごとの氾濫域や浸水深の分布に関して実験結果と計算結果とを比較することで、氾濫解析モデルごとの特徴および氾濫解析モデルの妥当性を評価することを目的とする。

ここに本論文の構成を示す。

・第2章

氾濫実験の概要を示す。使用した氾濫台ならびに市街地模型の概要について述べた後に、計測手法・実験条件を示し、最後に実験結果をまとめる。

・第3章

氾濫解析の概要を示す。本研究で用いた3手法の格子分割・計算手法、3手法に共通する計算条件を示し、最後に計算結果をまとめる。

・第4章

考察を行う。実験と氾濫解析3手法の結果を互いに比較し、モデルごとの特性、今後の課題に言及する。

・第5章

結論を記す。

第 2 章 氾濫実験

2.1 実験模型の概要

2.1.1 氾濫台の概要

本研究では、氾濫台上に建物模型を配置することで市街地を表現する。氾濫台は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにある氾濫台実験装置を用いた。実験装置の概要を図 2.1 に示す。

実験装置は主に氾濫台、水路、ポンプ、貯留槽、上流水槽から成る。水路部は幅 50cm、深さ 15cm で、流入部は幅 40cm である。水路部に設けた止水板は取り外しが可能で、止水板が取り外された状態では上流水槽から流れ出た水はすべて水路を通過して下流端の貯留槽へ行き着く。止水板を取り付けると、上流水槽から水路へ流れ込んだ水は流入部から氾濫台上の市街地領域へと進み、氾濫台を下って貯留槽に流れ込む。貯留槽に貯まった水はポンプによって上流水槽へ汲み上げられる。なお、氾濫台の大きさは 10m×20m であるが、以降建物模型を置き並べる市街地領域は流入部周辺の一部であり、氾濫台全体ではないことに留意されたい。また、本実験で扱う水は氾濫台の上方から氾濫域を視覚的に把握するためメチレンブルー三水和物を溶かして青く着色した。

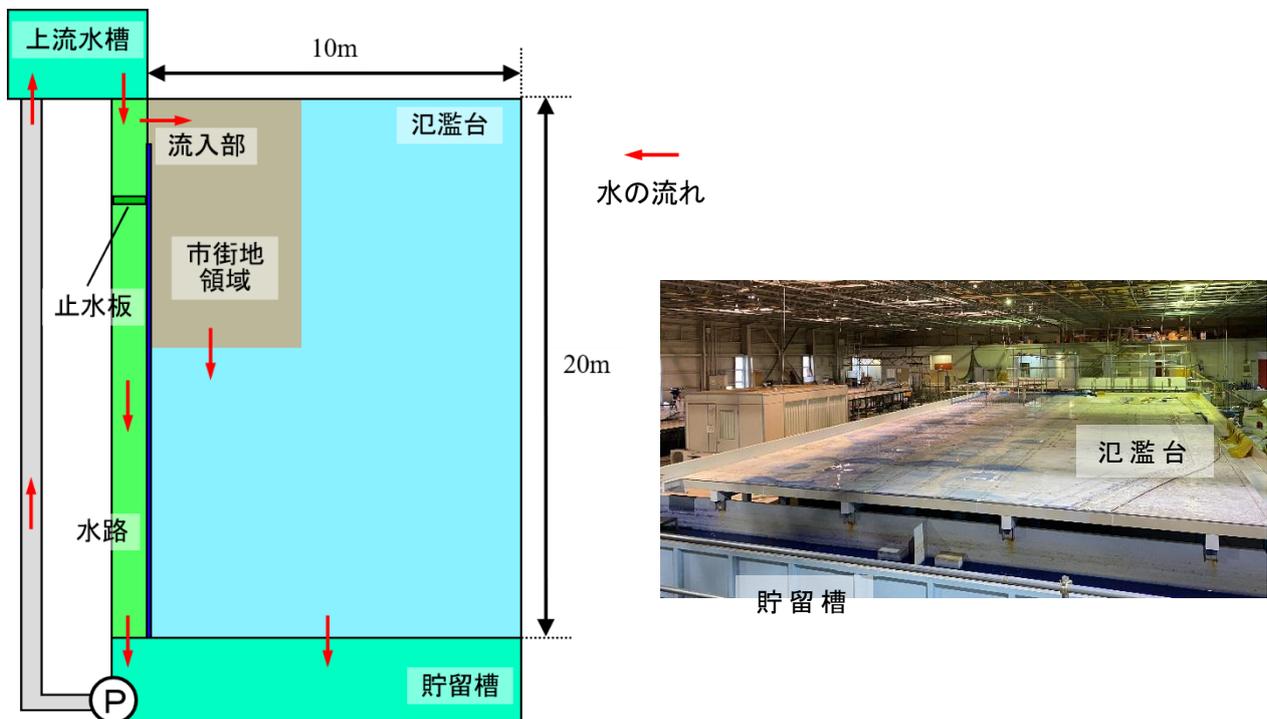


図 2.1 氾濫台実験装置

2.1.2 建物配置の検討

具体的な建物配置をもつ市街地模型を作成するにあたり、本研究と同一の氾濫台を用いた中川ら¹³⁾の研究に倣って本実験では京都市中京区を対象とした。作成する市街地模型の縮尺も中川らと同じく 1/100 とした。具体的な対象領域は図 2.2 に示すように、南北を丸太町通と二条通，東西を東洞院通と柳馬場通に囲まれた範囲である。この地域は道路が碁盤目状に敷かれており，ここでは道路に囲まれた四辺形の部分を 1 つの「街区」と定義する。対象領域は南北方向に 3 つ，東西方向に 4 つの計 12 の街区が含まれ，図 2.3 に示すように街区には 1 から 12 までの番号を与えた。

続いて，市街地領域に配置する建物模型の形状を検討する。本研究では，実際の建物の大まかな配置や街区面積に占める建物面積の割合を維持しながら建物配置を簡略化することを図り，対象領域内にある建物の分類を試みた。まず，地理情報システムの閲覧・分析・編集ソフト「QGIS」を用いて，対象領域内の建物すべての面積・ x 軸方向の幅・ y 軸方向の幅を抽出した。 x 軸方向の幅と y 軸方向の幅のうち長い方を L ，短い方を S とし， L を S で除した値を「縦横比」とする。建物の分類は面積と縦横比で定めるとし，表 2.1 にその分類区分を示す。分類の境界は，面積が 700m^2 ， 150m^2 ，縦横比が 3，2 であり，それぞれの区分に A から G までの記号を与えた。なお 700m^2 より大きい建物は対象領域内に 1 軒のみであったため，縦横比による分類は不要とした。次に，これらの区分を代表する建物模型の形状および寸法を定めた。区分 A，B，C，D，E，F の 6 種類は長方形の建物模型で作成することとし，式(2.1)，(2.2)に従って建物模型の短辺と長辺の長さを計算した。なお，式(2.1)，(2.2)において， \bar{S} は各区分に含まれる建物の平均面積， \bar{r} は平均縦横比であり，縮尺が 1/100 であるため 100 で除している。この式によって求められた各模型区分の辺の長さを表 2.2 に示す。また，模型 G の形状は街区 5 にある大型の建造物を模型の縮尺 1/100 に合わせたものである。これら 7 種類の建物模型を用いて表現された対象領域の建物配置を図 2.4 に示す。

$$\text{短辺の長さ } \ell_s : \quad \ell_s = \frac{\sqrt{\bar{S}/\bar{r}}}{100} \quad (2.1)$$

$$\text{長辺の長さ } \ell_l : \quad \ell_l = \frac{\sqrt{\bar{r}\bar{S}}}{100} \quad (2.2)$$



図 2.2 対象領域（赤枠内が対象領域）

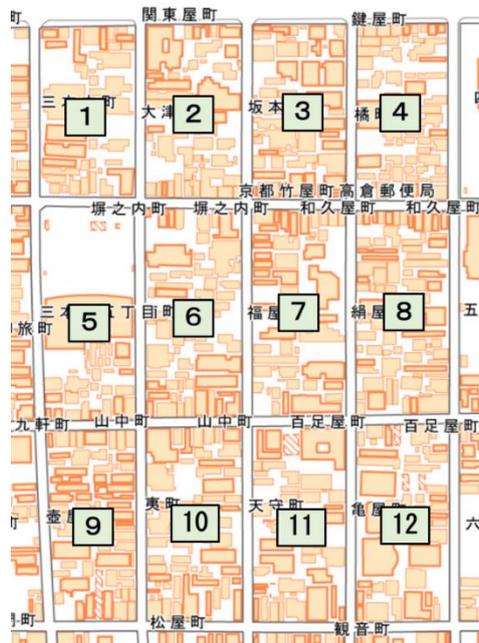
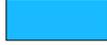
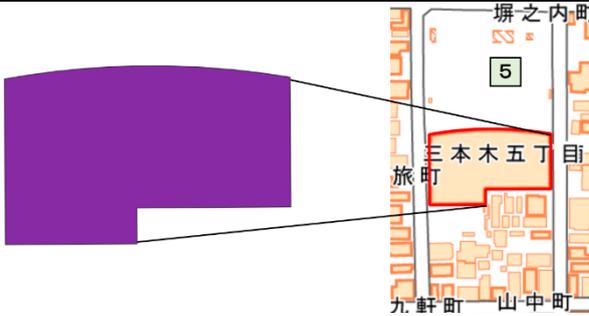


図 2.3 対象領域の街区番号

表 2.1 対象領域内の建物の分類区分

		縦横比 r		
		$r < 2$	$2 \leq r < 3$	$3 \leq r$
面積 S	$700 \leq S$	G (1 軒のみ)		
	$150 \leq S < 700$	A	B	C
	$S < 150$	D	E	F

表 2.2 建物模型の形状・寸法

	A	B	C
形状			
短辺長さ [mm]	142	102	71
長辺長さ [mm]	201	244	269
	D	E	F
形状			
短辺長さ [mm]	72	55	47
長辺長さ [mm]	103	134	178
	G		
形状			

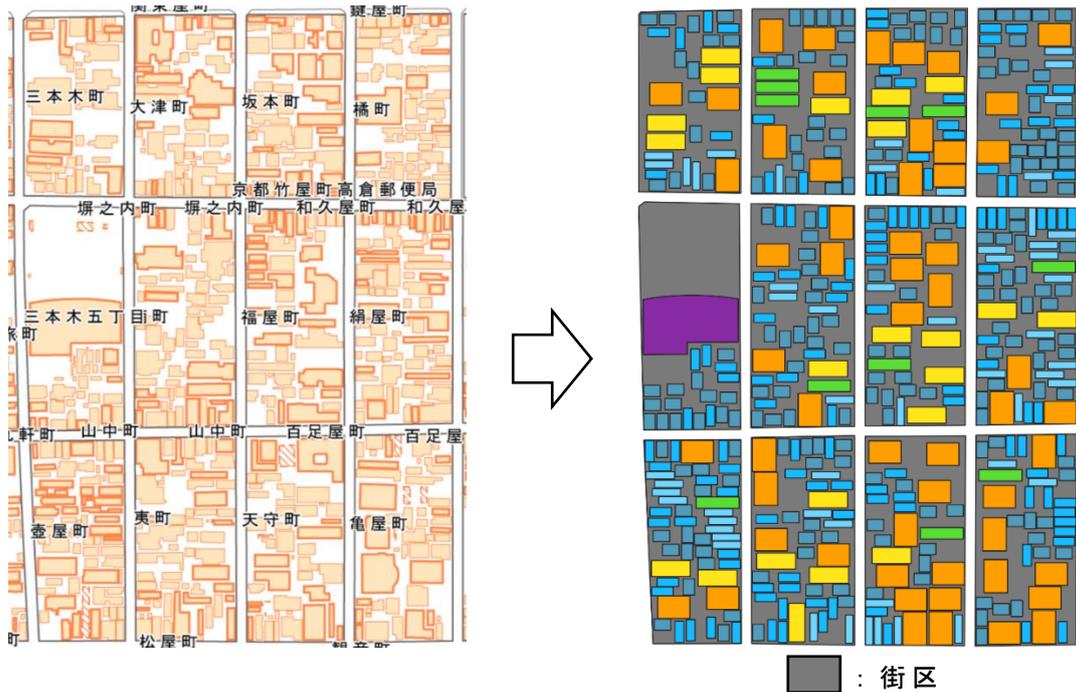


図 2.4 対象領域の建物配置
(建物の色・形状は表 2.1 と対応)

2.1.3 建物への浸水過程の表現

建物への浸水過程を模型実験で表現するために、前項で述べた建物模型をすべて 3mm 厚の塩化ビニル板で 4 面を囲う矩形枠組とし、その壁面に複数の穴を浸入口として開けることで氾濫水が内部に浸透するようにする。

ここで、浸入口の大きさを定める。桑村ら¹¹⁾の実験では 2m 幅の家屋外壁ユニットに存在する浸水口の面積は合計で数十 cm² のオーダーであった。しかし、その値をそのまま模型の縮尺に換算して建物模型壁面に開ける浸入口の大きさとする、浸入口は非常に小さくなってしまい模型への浸水は生じない。そこで本実験で用いる建物模型に開ける浸入口の大きさを定めるにあたって、建物模型と同じ塩化ビニル板の矩形枠組を 6 個用意し、その壁面に穴を 1 つ開けた。穴の直径は 6 つの模型で異なり、直径 1.0mm, 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm である。これを水槽床に固定し、模型の外部を水で満たしたところ、直径 3.5mm 以下の穴からは浸水しなかったため、本研究で用いる建物模型に開ける穴は直径 4mm とした。なお、模型 G は大型な堅牢建物を模しており、本実験では壁面に穴を開けることなく非浸水として扱う。次に模型に開ける穴の個数であるが、建物模型外周にある空隙面積の総和が桑村らの実験に基づいて計算されたものと近い値とすることを目標にした。模型 A から F に開ける浸水口の位置や寸法については図 2.5 の通りである。図中 L は側面端から最も近い穴までの長さであるが、その値は建物模型の区分によって異なるため表 2.2 に示す。また、穴の中心間距離はすべ

て 4cm であり，建物模型の区分ごとの 1 台あたりの浸入口の個数を表 2.3 に示す．そして，浸入口を開けた建物模型の画像を図 2.6 にまとめる．また，模型の高さはすべて 7cm であるが，氾濫実験のいかなる時刻においても模型周辺の水深が 7cm を超えることはなかった．

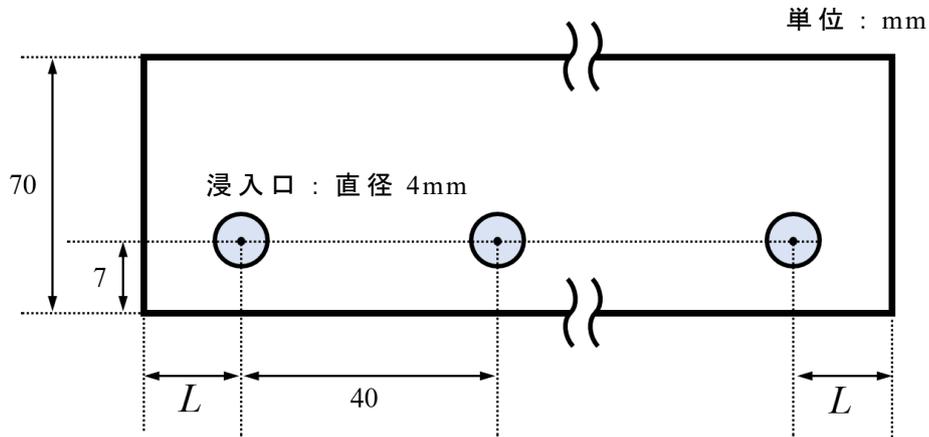


図 2.5 建物模型壁面浸入口の位置・寸法（側面図）

表 2.2 建物模型の分類ごとの L の値

		A	B	C	D	E	F	G
L [mm]	短辺	10.5	11	15.5	16	7.5	21.5	非浸水
	長辺	20.5	22	14.5	31.5	27	9	

表 2.3 建物模型 1 台あたりの浸入口個数

		A	B	C	D	E	F	G
浸入口個数[個]	短辺	4	3	2	2	2	1	非浸水 (0 個)
	長辺	5	6	7	2	3	5	
浸入口総数[個]		18	18	18	8	10	12	

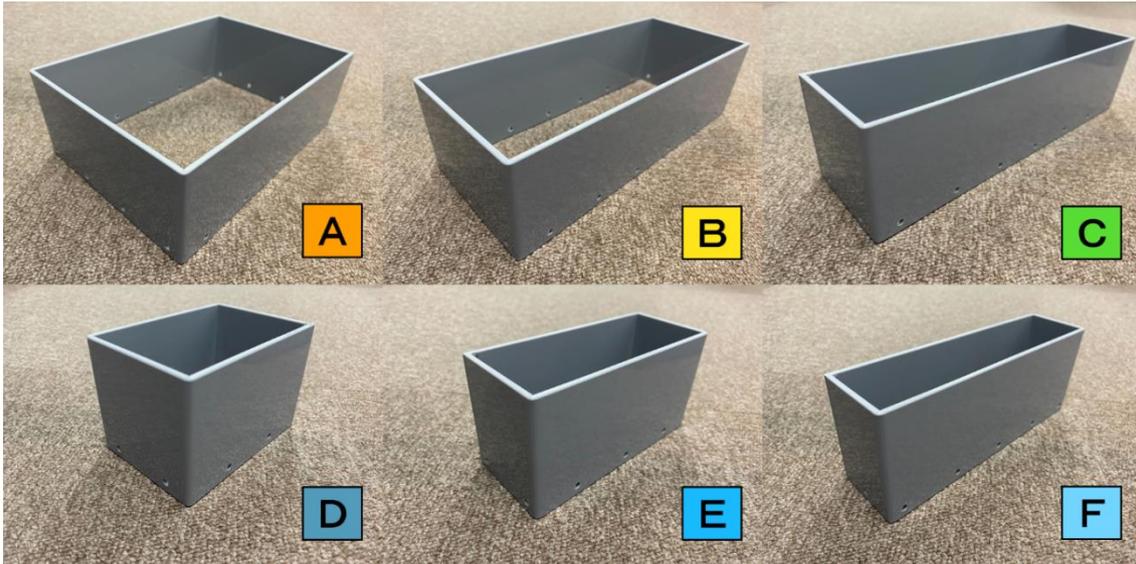


図 2.6 建物模型

2.1.4 市街地領域の作成

氾濫台の市街地領域に建物模型を配置したものを図 2.7 に示す。1 項図 2.1 で示した氾濫台の市街地領域にアクリル板を敷き、図 2.4 で街区となっている部分にはさらに 1mm 厚のアクリル板を敷く。その上に 3 項で示した建物模型を図 2.5 の通り置き並べる。市街地領域の最下端には高さ 1cm の越流堰を設けている。その他の端辺は流入部以外壁であり、市街地領域に流入してきた氾濫水は越流堰を超えること以外で流出はしない。また、市街地領域の標高分布を図 2.8 に示す。ただし図 2.8 に示す標高値は、流入部上端の点の標高を 0 とした場合の相対値であり、街区の 1mm 嵩上げや越流堰の高さは加味する以前のものである。また、図中矢印の方向を横断方向、流下方向と定義する。

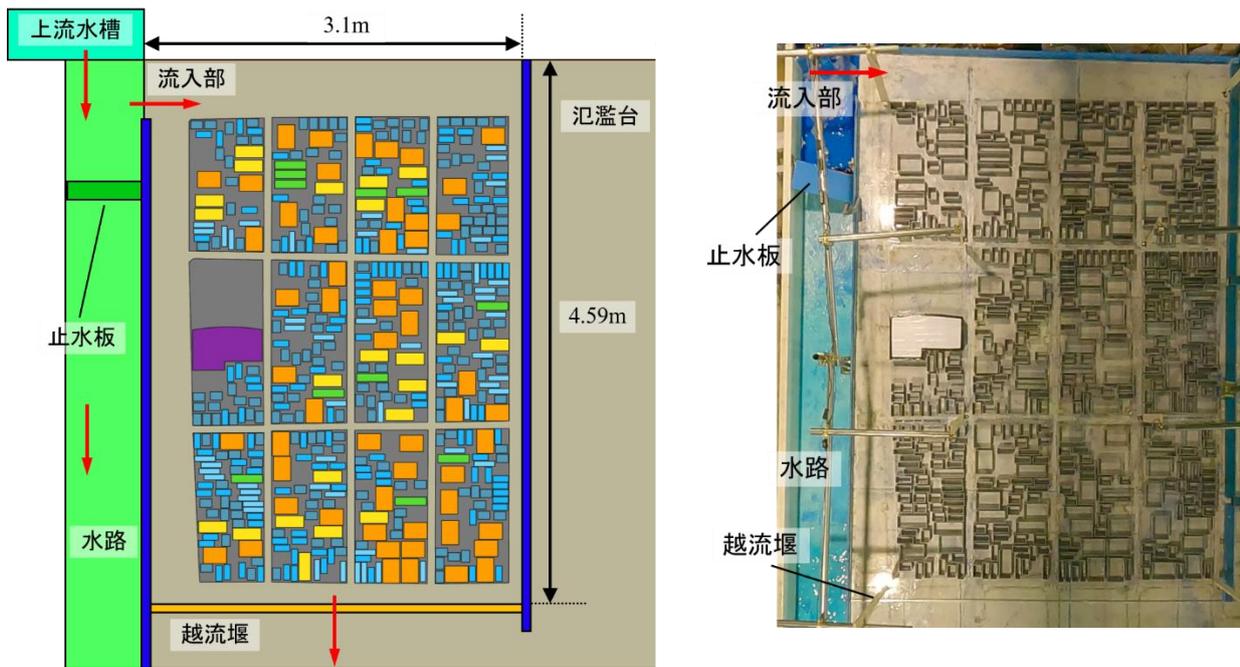


図 2.7 建物模型を配置した市街地領域

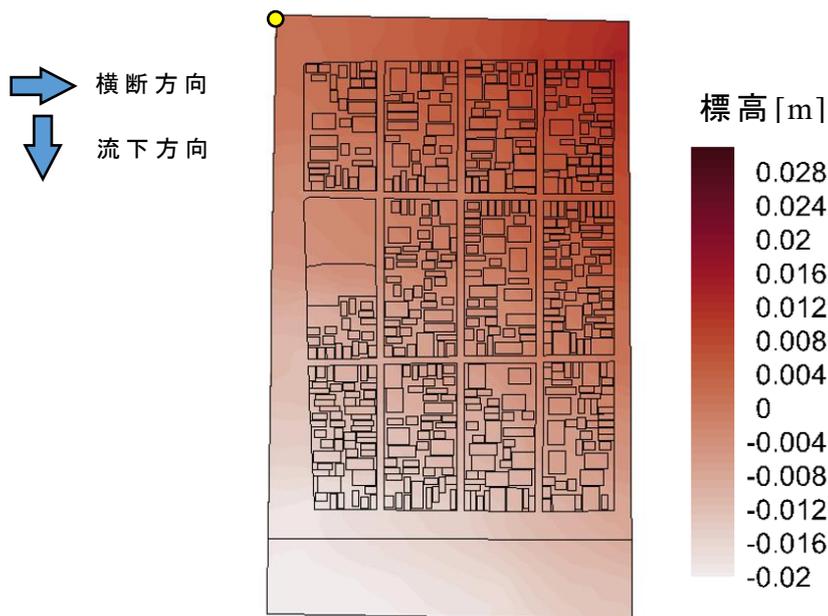


図 2.8 市街地領域の標高分布（●点を 0 としたときの相対値）

2.2 氾濫実験の概要

2.2.1 計測項目・手法

本実験では、市街地領域内の 8 カ所に設置した超音波変位計で水深を計測し、氾濫台の鉛直上方に固定したビデオカメラの撮影により氾濫水の挙動を確認した。

本実験で用いる超音波変位計は表 2.4 に示す 2 種類を合計 8 セット用いた。いずれの

超音波変位計もセンサ部とアンプ部で成り立っている。また、超音波変位計から出力されたデータは株式会社キーエンス製のデータロガー（品番：NR-600）にまとめて回収した。図 2.9 に超音波変位計とデータロガーを示す。株式会社キーエンス製の超音波変位計は電流計を出力し、オムロン株式会社製の超音波変位計は電圧値を出力するため、その出力値を距離に変換するためのキャリブレーションを実験前に実施した。これらの超音波変位計を図 2.10 に示す位置に固定し、s1 から s8 までの番号を振った。実験中はすべての超音波変位計のサンプリング周期を 5Hz に設定して計測を行った。なお、超音波変位計は図 2.11 のように、市街地領域周辺に単管パイプで櫓を組み、そこから市街地領域鉛直上方へ伸ばした片持ち梁に取り付けることで設置した。そのため、超音波変位計および周辺機器が氾濫水の挙動に影響を及ぼすことはない。

表 2.4 使用した超音波変位計

	製造	使用数	センサ品番	アンプ品番	出力
1	株式会社キーエンス	4	FW-H02	FW-V20	電流値
2	オムロン株式会社	4	E4C-DS30	E4C-UDA11AN	電圧値

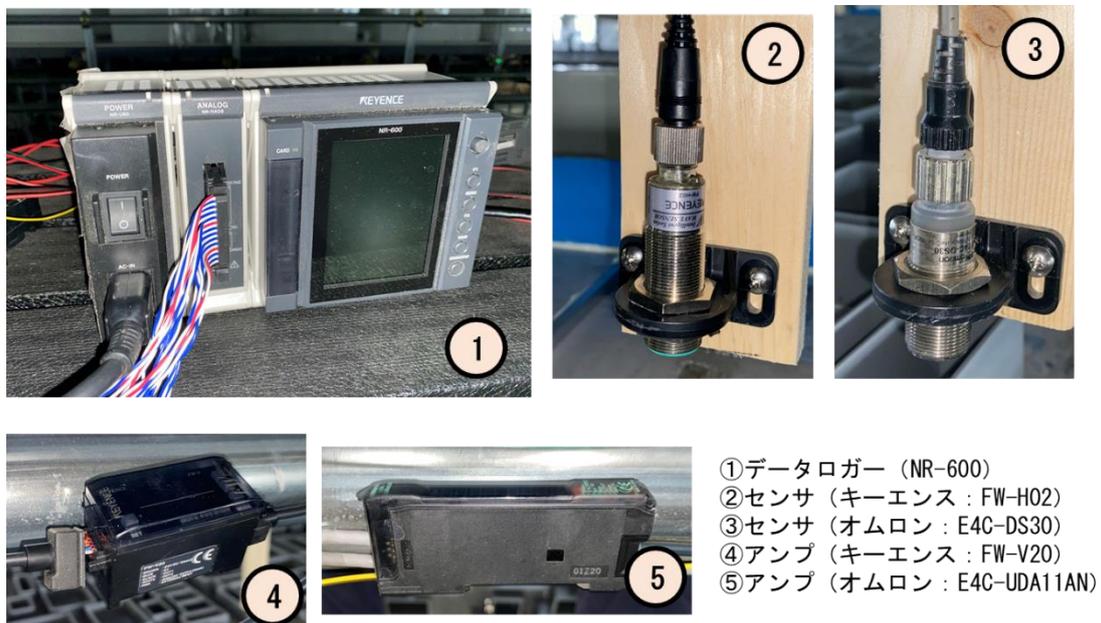


図 2.9 超音波変位計とデータロガー

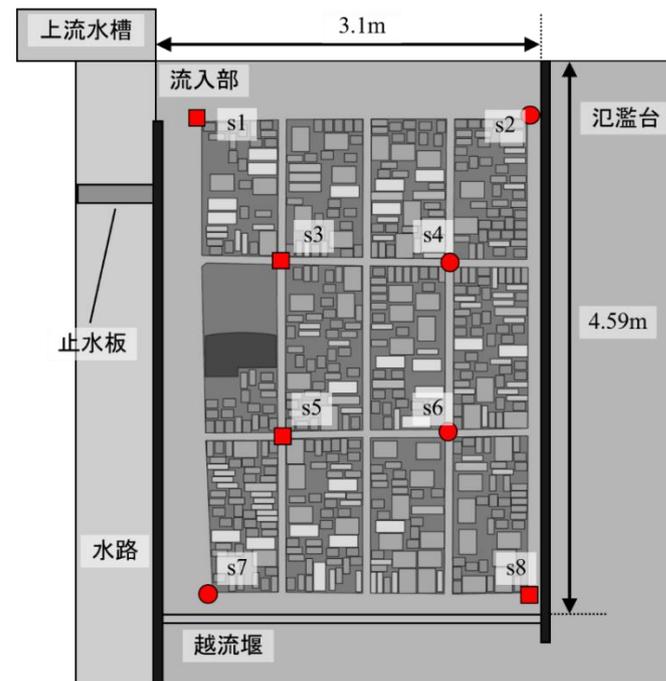


図 2.10 超音波変位計による計測位置

(四角形：株式会社キーエンス製，丸形：オムロン株式会社製)

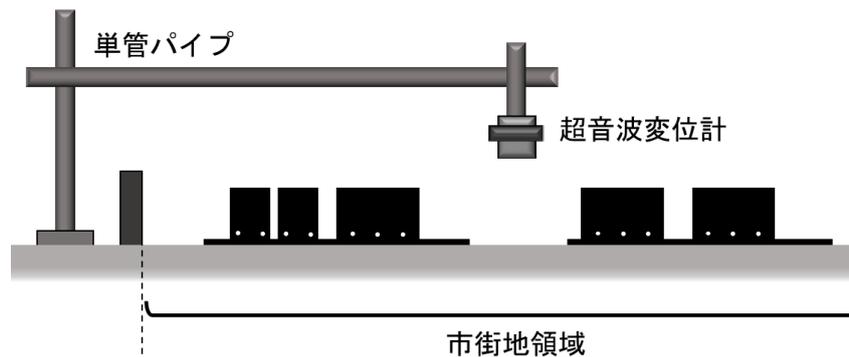


図 2.11 超音波変位計の設置方法

2.2.2 実験条件

本研究では流入部から一定の流量を与え続ける．その流量を変えた複数ケースの実験を実施する．実験ケースを表 2.5 に示す．本実験と同じ氾濫台で同じ縮尺の市街地模型を用いた実験を行った中川ら¹³⁾が「昭和 10 年と同程度の規模の氾濫が生じたとき」を想定して 1.0L/s の流量を市街地領域に与えていることから，流入部から 1.0L/s を与えるケースを Exp-1 とする．さらに，流量を大きくしたケースとして，流入部から 2.0L/s, 2.8L/s を与えるケースを Exp-2, Exp-3 とする．

表 2.5 実験ケース

実験ケース	流入流量
Exp-1	1.0 L/s
Exp-2	2.0 L/s
Exp-3	2.8 L/s

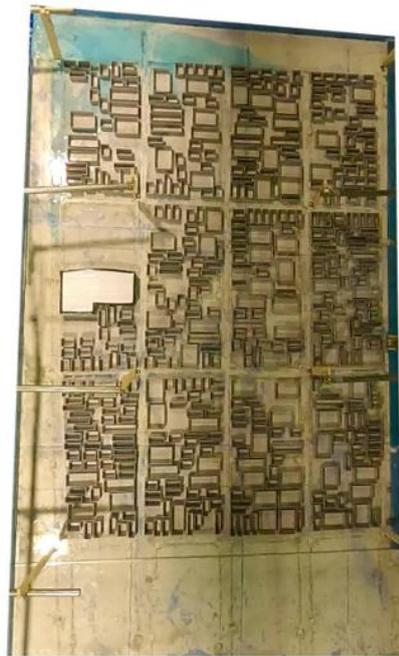
2.3 実験結果

以降、すべてのケースにおいて、流入部から水が流れ込み始めた時刻を 0 とする。また、市街地領域の街区を指す際には図 2.3 の記号および番号を用いる。

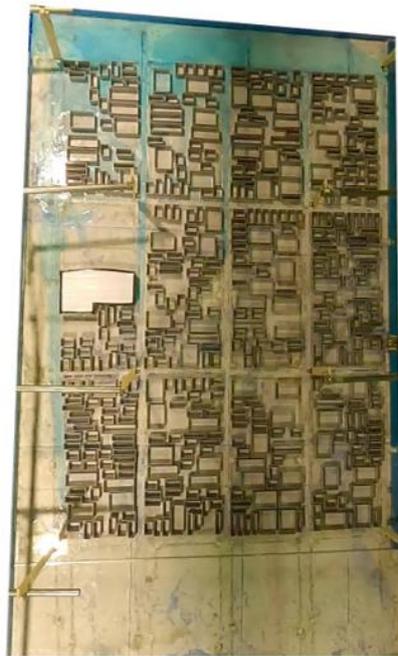
氾濫台上方に取り付けたビデオカメラの映像から流入開始 10, 20, 30, 40, 50, 60 秒後の画像をキャプチャしたものを図 2.12～図 2.14 に示す。いずれのケースにおいても、流入部から流れ込んだ水はそのまま横断方向へ直線的に進む流れが大きくなった。その後、Exp-1 では道路に沿った流下方向への流れが大きく、下流端堰に到達し越流を始める。どのケースにおいても、道路の水深が 2mm 程度では 1mm 嵩上げた街区に氾濫水が流れ込まないことが確認された。

浸水した建物模型について、Exp-1 では街区 1, 2, 3, 4 の建物模型数個のみが浸水した。Exp-2 と Exp-3 でも街区 1, 2, 3, 4 の建物模型の多くは流入開始 20 秒までに浸水を始めており、越流堰から流出を始める時刻には Exp-2 では街区 1, 2, 3, 4 に加え街区 9, 10, 11, 12 の建物模型が浸水し、Exp-3 ではすべての街区において多くの建物模型が浸水した。下流に越流堰を設置した上に、Exp-1, Exp-2, Exp-3 の順に流量が大きくなっているため、この順に浸水する建物模型が増えるのは明らかである。

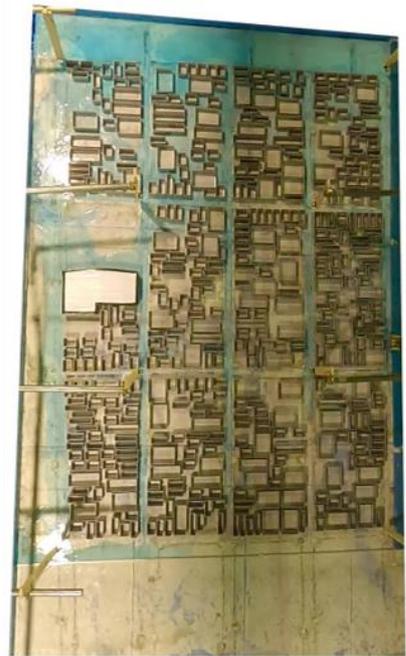
続いて、8 カ所の超音波変位計によって計測された水深を図 2.15～図 2.16 に示す。なお、図 2.15～図 2.17 の凡例の番号は前節で示した超音波変位計による水深計測位置を表している。各点の水深について、いずれのケースも s1 での水深が最初に上昇を始め、その水深はおおよそ 8mm に落ち着いた。s1 の次に水深が上昇を始めたのが s2 であった。s2 の水深は Exp-2, Exp-3 では s1 と比較して大きく上昇した。このことから、流入部からの水は、下流の道路や街区に流れ込むよりも、横断方向に直線的に進む流れが大きいことが分かる。s2 の水深が上昇してからは s3, s4, s5, s6, s7, s8 の水深が上昇を始めた。s7, s8 の水深は s3, s4, s5, s6 の水深よりも大きく上昇しているが、これは道路に沿って下流へ向かった氾濫水が越流堰に到達し堰き止められたためである。特に、Exp-1 は建物浸水があまり進行せず、道路に沿って下流へ向かう流れが大きくなったため、s7, s8 の水深がもっとも高くなり、それ以外の点では 10mm よりも低いままであった。



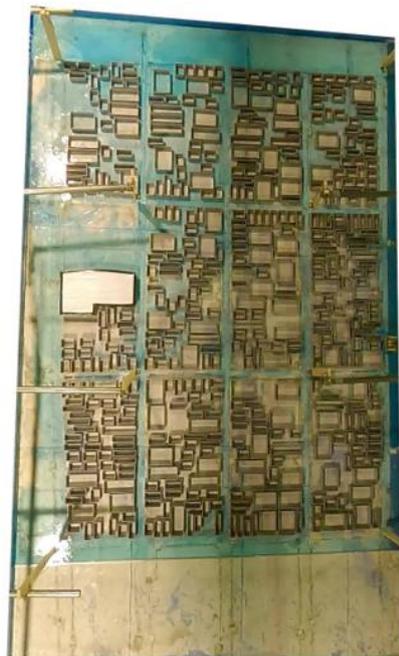
t = 10 [s]



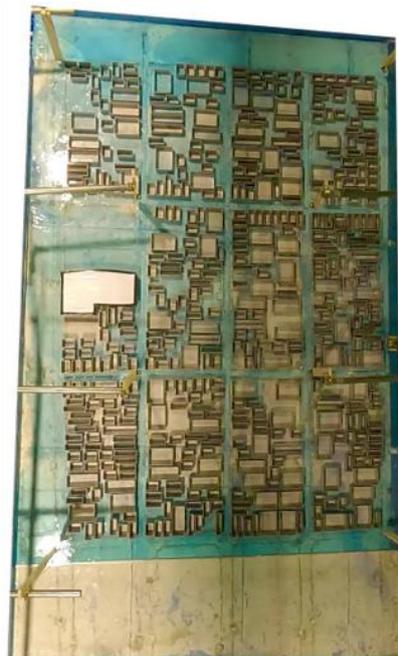
t = 20 [s]



t = 30 [s]



t = 40 [s]



t = 50 [s]



t = 60 [s]

図 2.12 氾濫台上方ビデオカメラの画像(Exp-1)



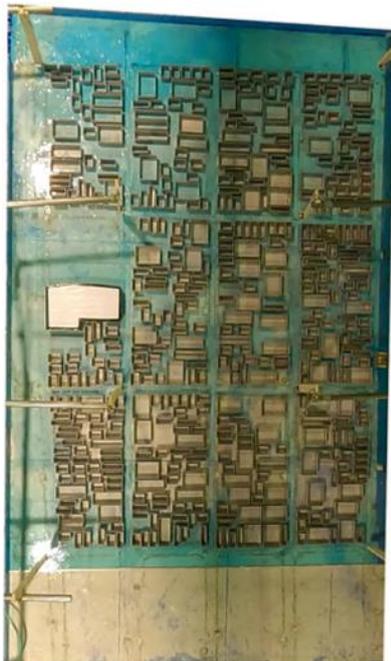
t = 10 [s]



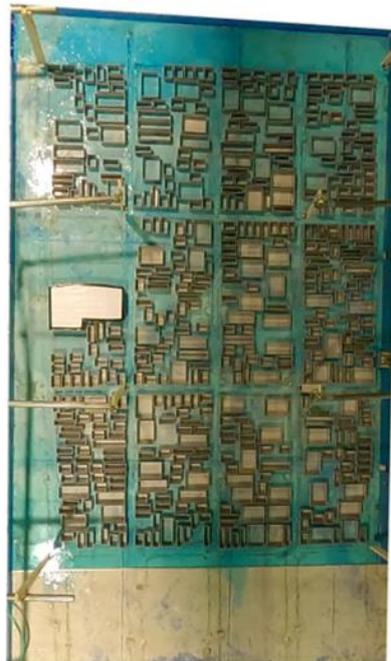
t = 20 [s]



t = 30 [s]



t = 40 [s]

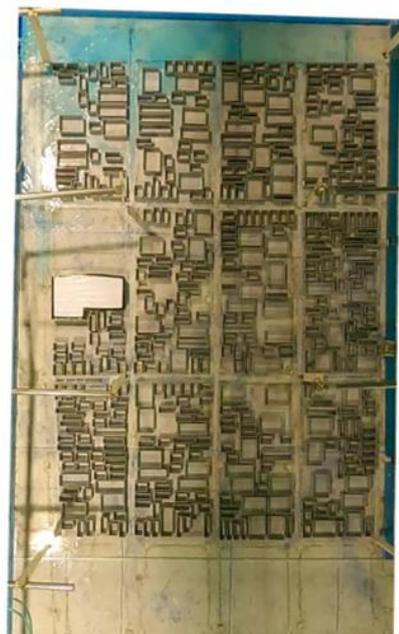


t = 50 [s]

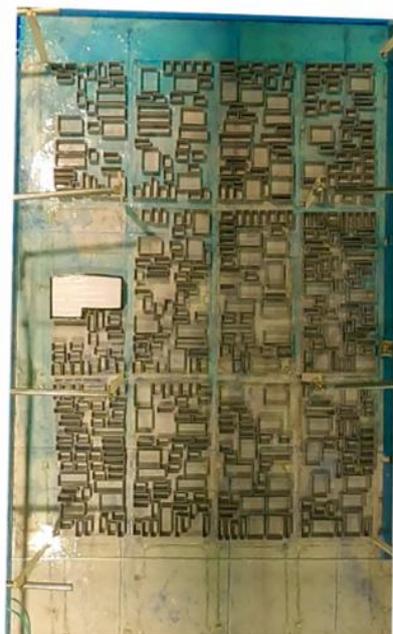


t = 60 [s]

図 2.13 氾濫台上方ビデオカメラの画像(Exp-2)



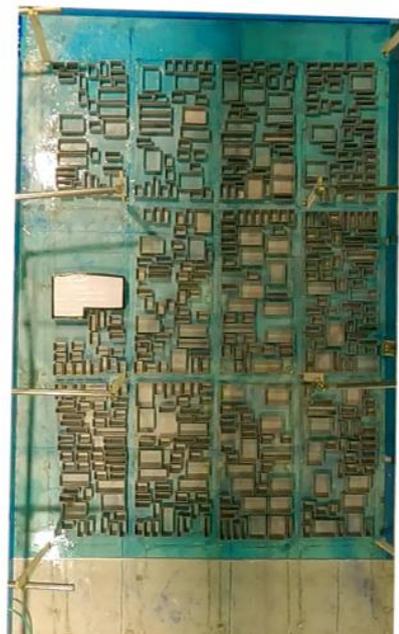
t = 10 [s]



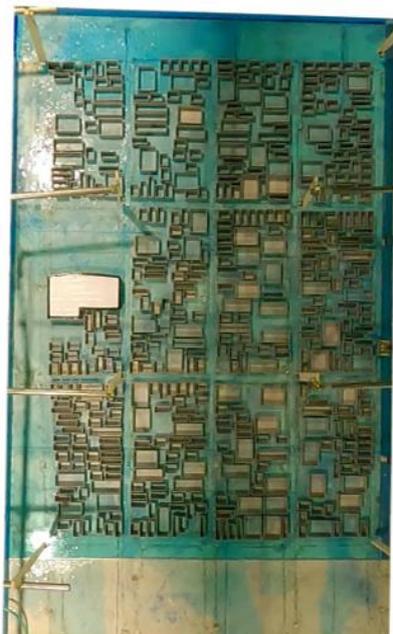
t = 20 [s]



t = 30 [s]



t = 40 [s]



t = 50 [s]



t = 60 [s]

図 2.14 氾濫台上方ビデオカメラの画像(Exp-3)

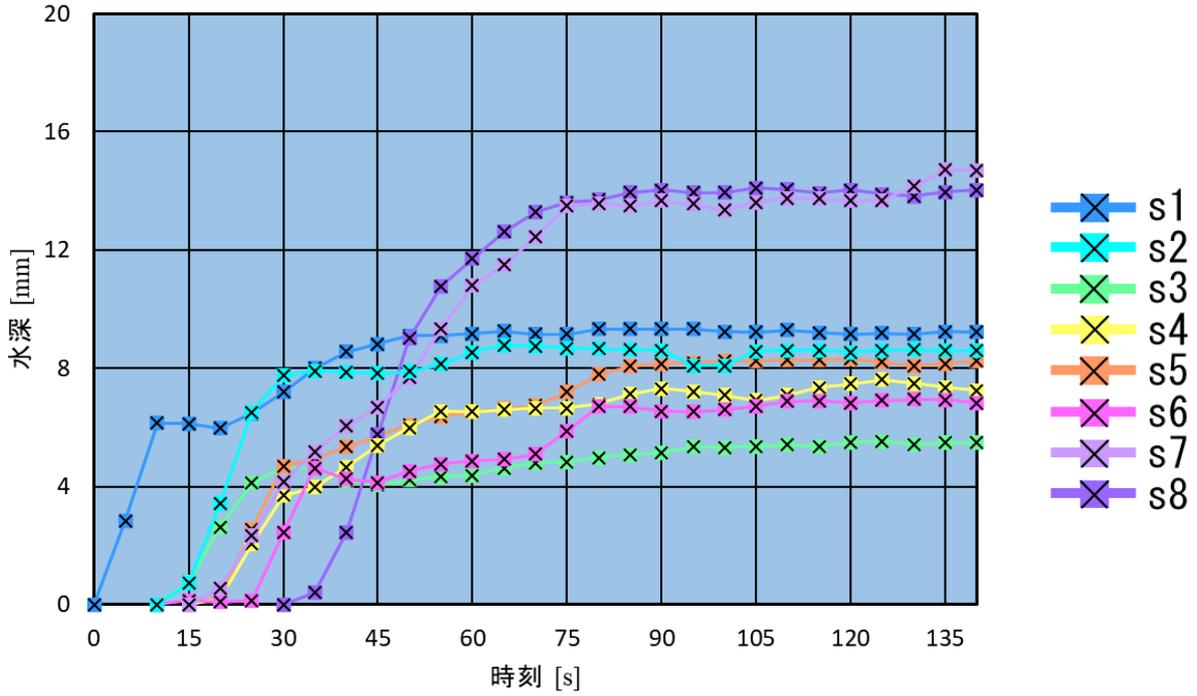


図 2.15 水深の時間変化(Exp-1)

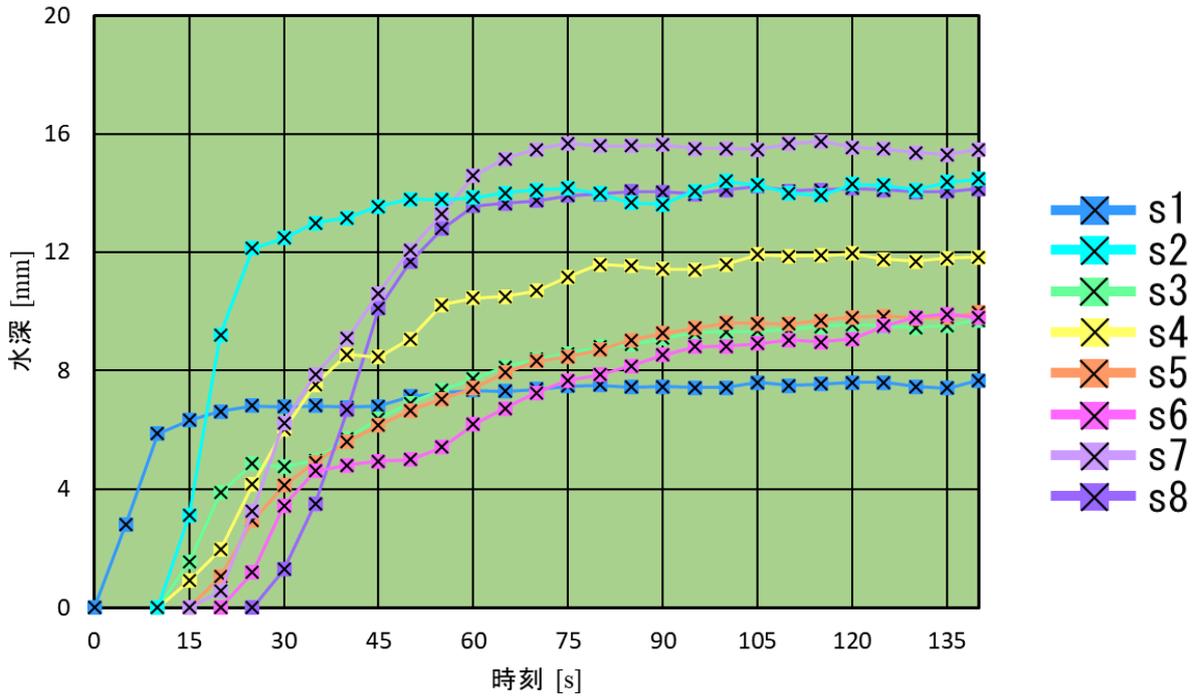


図 2.16 水深の時間変化(Exp-2)

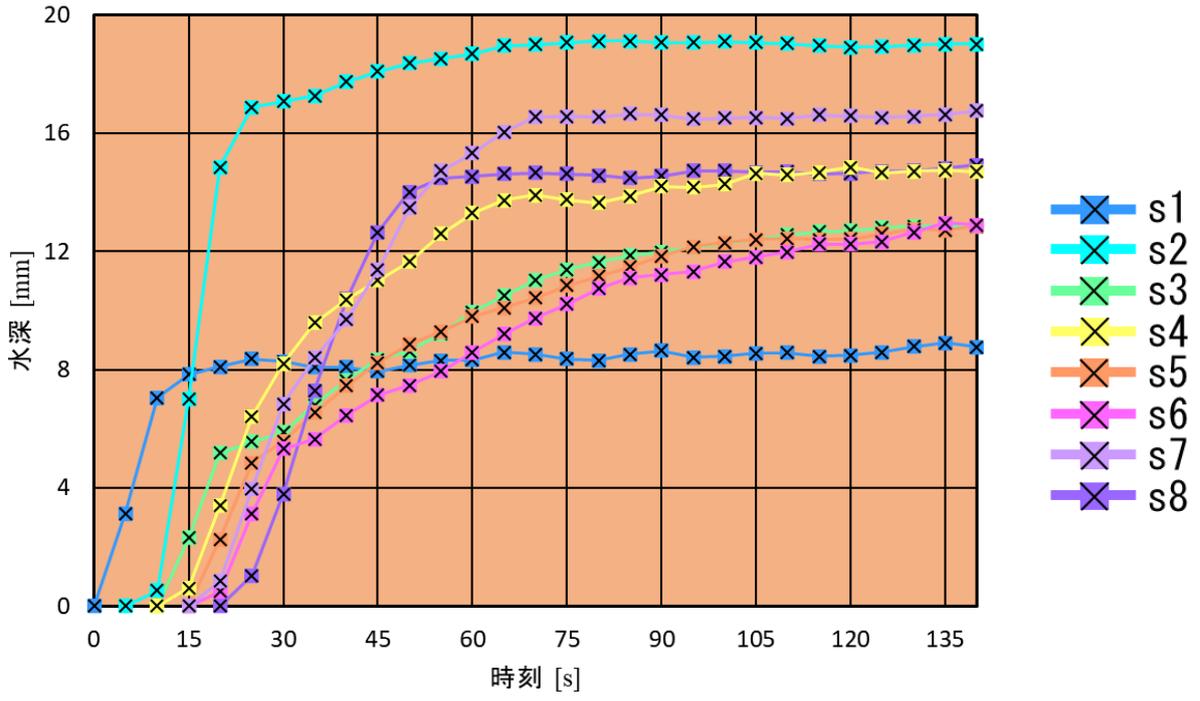


図 2.17 水深の時間変化(Exp-3)

第3章 氾濫解析

先述の実験で用いた氾濫台を対象領域として氾濫解析を試みる。本研究では、3種類の平面二次元氾濫解析手法を実行し、実験および他の氾濫解析の結果と比較する。3つの手法をそれぞれ以下のように称する。

- ・境界浸水モデル
- ・国交省モデル
- ・格子内浸水モデル

ここで、3つの手法の特徴および互いの相違点を、特に建物の扱いに着目して説明する。境界浸水モデルは藤森ら¹²⁾が提示した構造格子を用いたモデルを非構造格子に対応させたものである。この手法は、格子分割の際に建物の境界と格子辺を一致させる必要がある。そして建物と非建物の境界でトリチェリの定理を適用することで、建物外の氾濫水が時間をかけて建物内に浸透する様子を表現したモデルである。国交省モデルは国交省マニュアルに標準的な手法として記載されているものである。この手法では矩形構造格子を用いており、格子内の建物の占有率および抗力係数を基礎式に適用することで建物の存在を考慮している。格子内浸水モデルは、矩形構造格子を用いて建物の占有率と抗力係数を計算に加味する点においては国交省モデルと同じである。国交省モデルとの相違点として、建物を内包する格子に建物内水深と建物外水深の2種類を定義する点が挙げられる。これによって、1つの格子内で建物への時間をかけた浸水を表現することを試みる。各手法の詳細な計算手法を以下に記す。

3.1 境界浸水モデル

3.1.1 対象領域の格子分割

境界浸水モデルは、非構造格子を用いた川池⁵⁾の氾濫解析法を原型とし、建物格子と非建物格子の境界に藤森ら¹²⁾の用いた式を適用することで建物への浸水を表現する。非構造格子を用いる利点は、建物の外周線と格子境界を一致させることで建物形状を解析格子で表現することができ、境界での流量を直接計算できる点にある。その他にも、格子の大きさを任意に変更できるため建物の有無に関わらず複雑な地形に対応できる点が挙げられる。

対象領域を非構造三角形格子に分割する際、建物と街区の境界が格子辺と一致するように調整した。そして、各格子に建物格子・街区格子・道路格子の属性を与えた。属性ごとの格子数は、建物格子：7371個、街区格子：7555個、道路格子：5043個で、合計19969格子であった。対象領域の属性分布は図3.1に示す通りで、以降は街区格子と

道路格子を非建物格子と称する．また，実験で模型 G を配置した大型建物に重なる格子は氾濫水が一切流れ込まない非浸水格子である．

対象領域の標高は実験で扱った氾濫台の標高を用いる．実験で街区の形に 1mm 厚アクリル板を敷いたことを再現するために，建物格子と街区格子の標高を 1mm 上げている．また，越流堰より下流にある格子の標高は 1cm 嵩上げしている．

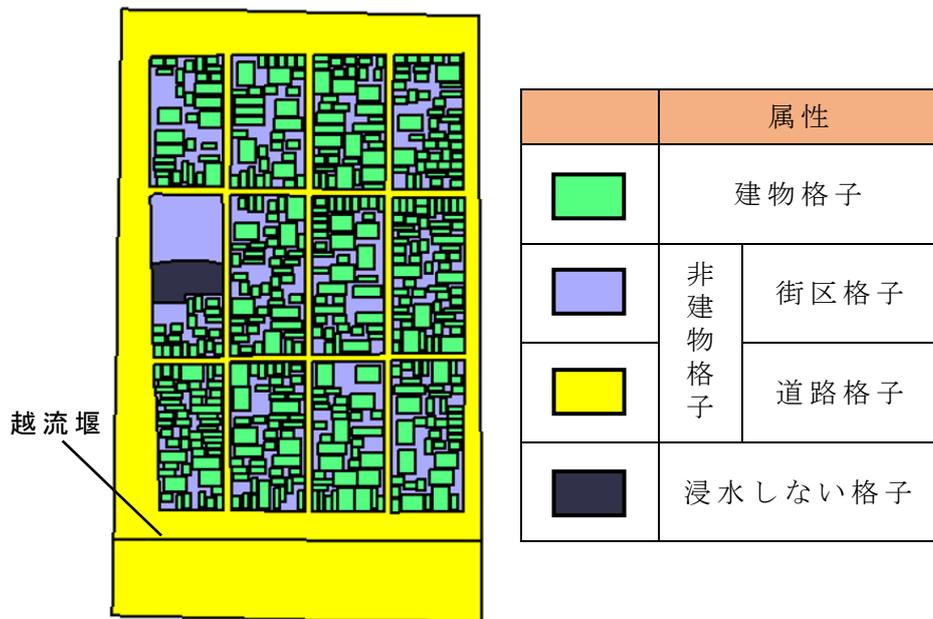


図 3.1 格子属性分布

3.1.2 計算手法

本モデルで用いた基礎方程式をデカルト座標系で表すと以下のような平面二次元浅水流方程式となる．

－連続式－

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

－運動量式－

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3.3)$$

ここで， h ：水深， u, v ： x, y 方向の流速， M, N ： x, y 方向の流量フラックス ($M = uh, N = vh$)， n ：粗度係数， H ：水位（水深＋地盤高）， g ：重力加速度， t ：時間， x, y ：デカルト座標の座標値である．

運動量式については基本的に式(3.2)，(3.3)を用いるが，図 3.2 のように氾濫水が不連

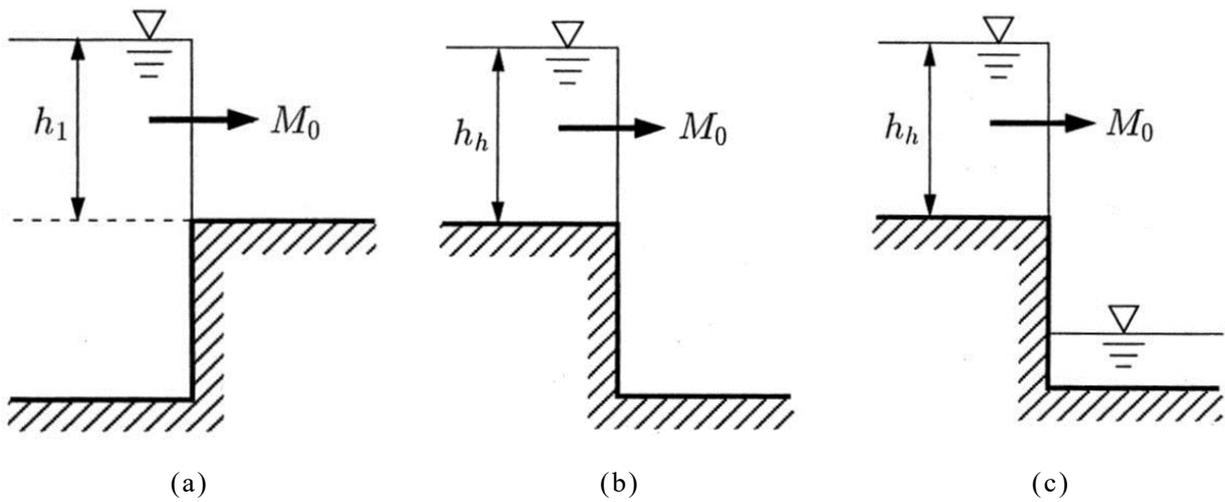
続となっている場合は以下の式を用いる．氾濫水の先端が図 3.2(a)のような場合には，図中の水深 h_1 を以下の越流公式に適用して流量フラックス M_0 を求める．

$$M_0 = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (3.4)$$

ここで， μ ：流量係数で $\mu=0.35$ である．また，氾濫水の先端が図 3.2(b)のような場合，あるいは図 3.2(c)のように地盤高の低い格子の水深がもう一方の地盤高よりも低い場合，図中の水深 h_h を以下の段落ち式に適用して流量フラックス M_0 を求める．

$$M_0 = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (3.5)$$

ここでは，井上¹⁴⁾に従い $\mu=(2/3)^{3/2}$ を用いる．なお，これらの式で流量フラックス M_0 を求めた後に x 方向成分と y 方向成分に分解する．



(a) 越流公式を用いる場合

(b) 段落ち式を用いる場合(1)

(c) 段落ち式を用いる場合(2)

図 3.2 氾濫水の不連続部分

さらに，建物格子と非建物格子の境界における流量フラックスは藤森ら⁹⁾に従って以下の式で計算する．図 3.3(a)のように建物内の水位が浸入口の高さに達していない場合は式(3.6)，図 3.3(b)のように建物内の水位が浸入口の高さに達している場合は式(3.7)を用いる．また，建物外の水位が浸入口の高さに達していない場合は建物には流入しないものとし，流量フラックスは 0 とした．

$$M_0 = a\sqrt{2g(H_o - H_a)} \quad (H_i < H_a) \quad (3.6)$$

$$M_0 = a\sqrt{2g(H_o - H_i)} \quad (H_i \geq H_a) \quad (3.7)$$

ここで， a ：浸入口面積である．浸入口面積に関して，実験で用いた建物模型は一定間隔ごとに浸入口が開いているが，解析では建物の側面に一様に浸入口が開いているものとして扱う．4cm に 1 つ直径 4mm の浸入口があると仮定して，建物の側面 1m あた

りの浸入口面積 a には $a=3.1 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$ を用いた. また, H_i : 建物内の水位, H_o : 建物外の水位, H_a : 浸入口の高さである. H_i , H_o , H_a は以下のように定義する.

$$H_o = h_o + z_o \quad (3.8)$$

$$H_i = h_i + z_i \quad (3.9)$$

$$H_a = h_a + \frac{z_o + z_i}{2} \quad (3.10)$$

ここで, z_i, z_o : 建物内外のそれぞれの標高である. また, 浸入口高さ h_a は $h_a = 7 [\text{mm}]$ とする. なお, これらの式で流量フラックス M_0 を求めた後に x 方向成分と y 方向成分に分解する.

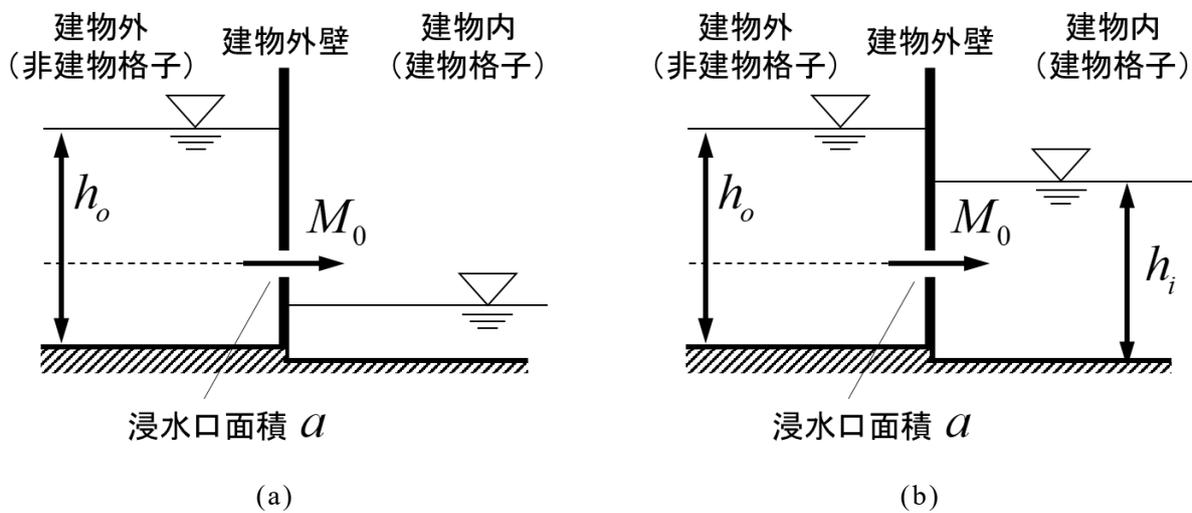


図 3.3 建物格子と非建物格子の境界

3.2 国交省モデル

3.2.1 対象領域の格子分割

国交省モデルでは, 国交省マニュアルに記載されている手法を用いる. このモデルでは対象領域を矩形格子に分割して計算を行う. 計算メッシュのサイズに関して, 国交省マニュアル⁴⁾に「25mを目安に適切に設定」(p.14)とあるため, 縮尺を合わせて1辺25cmの正方形格子を用いた. また, より細かい1辺10cmの正方形格子を用いた計算も併せて行った. 25cmメッシュは横断方向に13個, 流下方向に22個の計286個の格子から成る. 10cmメッシュは横断方向に33個, 流下方向に55個の計1815個の格子から成る.

国交省モデルにおいて, 格子に道路や建物の属性を与えることはなく, 建物の存在は空隙率を適用することで考慮される. 空隙率は図3.4のように格子面積に占める建物面積の割合(占有率)を1から引くことで算出される. 本モデルでの占有率は, QGISに

建物配置とメッシュを重ね、解析ツールを用いて各格子下に存在する建物の割合を算出することによって入手した。その後、格子の占有率を1から引いて空隙率を計算した。格子ごとの空隙率を図3.5に示す。また、境界浸水モデルと同様、対象領域の標高は実験と同じである。実験で街区の範囲を1mm嵩上げしたことを反映するために、先述のQGIS内の解析ツールを用いて、格子面積における格子下に重なる街区面積の割合 r_d を算出し、 r_d [mm]だけ格子の標高を上げている。すなわち、格子内すべてが街区上にある場合は標高を1mm上げ、格子内の50%が街区で残りの50%が道路である場合は標高を0.5mm上げた。また、実験における越流堰より下流に位置する格子は標高を1cm上げた。

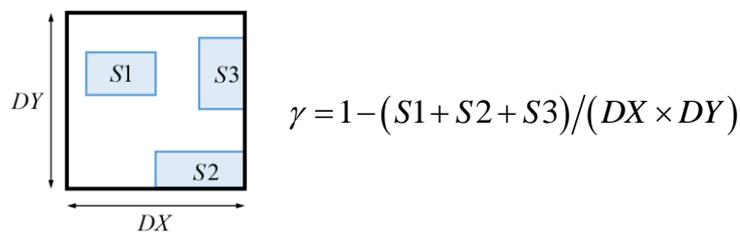


図 3.4 空隙率の定義

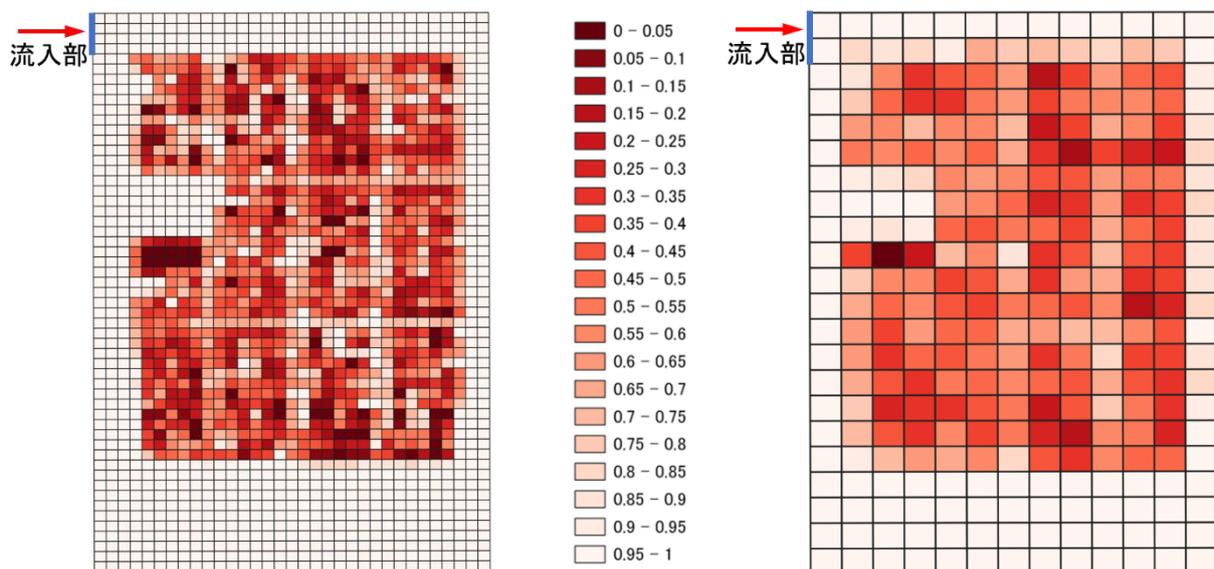


図 3.5 対象領域の空隙率（左：10m 格子，右：25cm 格子）

3.2.2 計算手法

国交省モデルに用いる基礎方程式をデカルト座標系で表したものを以下に示す。

－連続式－

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma M)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma N)}{\partial y} = 0 \quad (3.11)$$

－運動量式－

$$\gamma \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma u M)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma v M)}{\partial y} = -g\gamma h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g\gamma n^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - \frac{1}{2} C_D' (1-\gamma) M \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.12)$$

$$\gamma \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma u N)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma v N)}{\partial y} = -g\gamma h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{g\gamma n^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - \frac{1}{2} C_D' (1-\gamma) N \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.13)$$

ここで、 γ ：空隙率、 C_D' ：抗力係数÷建物の代表長さである。 C_D' は国交省マニュアルに従って 0.383 と定める。その他の変数は境界浸水モデルと共通である。空隙率 γ は前項で格子ごとに求めた値を用いる。ただし、国交省マニュアル⁴⁾には「空隙率が 0%に近い場合は計算が不安定となるため、空隙率の 5～10%程度の下限值を設定する」(p.14)との記述があり、それに従い本モデルでは空隙率が 0.10 未満の格子の空隙率は 0.10 に調整する。

また、氾濫水の先端の扱いは境界浸水モデルと同じで、式(3.4)、(3.5)の段落ち式と越流公式を用いる。係数 μ も境界浸水モデルと同様の値を用いる。

3.3 格子内浸水モデル

3.3.1 対象領域の格子分割

格子内浸水モデルで用いるメッシュは前節の国交省モデルと同じ矩形構造格子である。格子の大きさも同様に 25cm と 10cm の 2 通り用いて計算を行った。また、格子ごとの空隙率や標高分布も前節で示したのものを用いる。

3.3.2 計算手法

格子内浸水モデルは、格子内で建物への時間をかけた浸水の表現を目的としたモデルである。阿部らが領域内の全建物の辺のデータを入手して適用していたのに対して、本モデルでは建物ごとのデータには着目せずに格子内に占める建物の割合のみを考慮した。格子内に建物を含む場合、図 3.6 のように空隙率を維持しつつ格子中心に仮想の正方形建物を仮定する。ここで、格子内の正方形建物の部分を「仮想建物部」、仮想建物部以外の部分を「実質格子部」と称する。本モデルでは仮想建物部と実質格子部とで異なる水深を定義する。そして、実質格子部から仮想建物部への浸水量を計算することで、単一格子内で建物外から建物内への浸水を表現する。以下に用いた基礎式を示す。運動量式については国交省モデルと同一である。

－連続式－

$$\text{(実質格子部)} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma M)}{\gamma \partial x} + \frac{\partial(\gamma N)}{\gamma \partial y} = -\frac{q_{ex} \cdot L_B}{A_M} \quad (3.14)$$

$$\text{(仮想建物部)} \quad \frac{\partial h_B}{\partial t} = \frac{q_{ex} \cdot L_B}{A_B} \quad (3.15)$$

－運動量式－（国交省モデルと同一）

$$\gamma \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma u M)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma v M)}{\partial y} = -g\gamma h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g\gamma n^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - \frac{1}{2} C_D' (1-\gamma) M \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.16)$$

$$\gamma \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma u N)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma v N)}{\partial y} = -g\gamma h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{g\gamma n^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - \frac{1}{2} C_D' (1-\gamma) N \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.17)$$

ここで、 h ：実質格子部の水深、 h_B ：仮想建物部の水深、 λ ：建物占有率($1-\gamma$)、 q_{ex} ：実質格子部から仮想建物部への流量フラックス、 A_M ：実質格子部面積、 A_B ：仮想建物部面積、 L_B ：仮想建物部の外周長さである。その他の変数は境界浸水モデルおよび国交省モデルと共通である。また、 A_M 、 A_B 、 L_B は以下のように計算される。ただし dx, dy ：矩形格子の格子辺の長さである。

$$A_M = \gamma dx dy \quad (3.18)$$

$$A_B = (1-\gamma) dx dy \quad (3.19)$$

$$L_B = 4\sqrt{A_B} = 4\sqrt{(1-\gamma) dx dy} \quad (3.20)$$

空隙率について、国交省モデルと同様に 0.10 未満の格子の空隙率は 0.10 に調整することで計算の安定化を図る。さらに、本モデルでは空隙率が 1 に近い場合にも仮想建物部の面積が非常に小さくなることにより計算が不安定となる。そのため、0.9 以上の空隙率は 0.9 に変換する。ただし、格子内に建物がまったく存在せず空隙率が 1 である格子には、連続式(3.14)ではなく国交省モデルと同じ連続式(3.8)を用いた。実質格子部から仮想建物部への流量フラックス q_{ex} は、境界浸水モデルで建物境界に用いた式を適用することで求める。ただし、本モデルでは同一格子内で浸水が生じるため建物内外の標高は同じであり、水位ではなく水深に依存する。以下に式を示す。

$$q_{ex} = \begin{cases} a\sqrt{2g(h-h_a)} & (h_B < h_a) \\ a\sqrt{2g(h-h_B)} & (h_B \geq h_a) \end{cases} \quad (3.21)$$

a および h_a はそれぞれ境界浸水モデルで用いた浸入口面積、浸入口高さと同じであり、その値は $a=3.1 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$ （建物壁面幅 1m あたり）、 $h_a=7 [\text{mm}]$ である。なお、実質格子部の水深 h が h_a よりも小さい場合、この境界における流量フラックスは 0 となる。

氾濫水の先端の扱いは境界浸水モデルおよび国交省モデルと同じで、式(3.4)、(3.5)の段落ち式と越流公式を用いる。係数 μ も他モデルと同様の値を用いる。

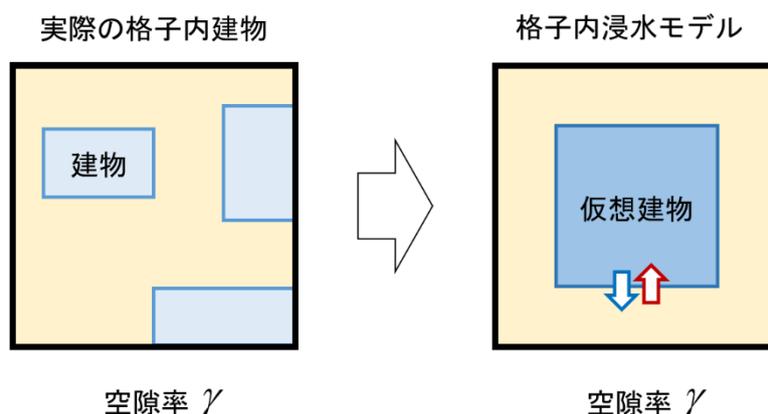


図 3.6 格子内浸水モデルにおける建物の扱い方

3.4 計算条件

表 3.1 に計算ケースを示す。境界浸水モデル，国交省モデル，格子内浸水モデルの 3 手法において，実験と同様 1.0L/s，2.0L/s，2.8L/s の 3 通りの流量を流入部となる格子辺に常に与えて計算を行った。流入部の幅は境界格子モデルの非構造格子では格子辺 2 個分の 37.2cm，国交省モデルと格子内浸水モデルの 25cm メッシュでは格子辺 2 個分の 50cm，10cm メッシュでは格子辺 4 個分の 40cm とした。実験の流入部幅 40cm と異なる場合は図 3.7 のように流入流量を与えた。10cm メッシュの場合は流入部となる各格子辺に流入流量の 0.25 倍となる流量を与えた。

氾濫水の下流端からの流出は，下流端に位置する格子の水深を毎時刻強制的に 0 とすることで処理した。また，全モデルの全格子において河床の粗度係数は実験で用いた氾濫台の表面素材がアクリル板であったことから 0.009 とした。移動限界水深はいずれのモデルにおいても 1.0×10^{-5} [m] を用いた。

表 3.1 解析ケース

		境界浸水 モデル	国交省モデル		格子内浸水モデル	
			25cm 格子	10cm 格子	25cm 格子	10cm 格子
流入流量	1.0 L/s	Sim-A1	Sim-BL1	Sim-BS1	Sim-CL1	Sim-CS1
	2.0 L/s	Sim-A2	Sim-BL2	Sim-BS2	Sim-CL2	Sim-CS2
	2.8 L/s	Sim-A3	Sim-BL3	Sim-BS3	Sim-CL3	Sim-CS3

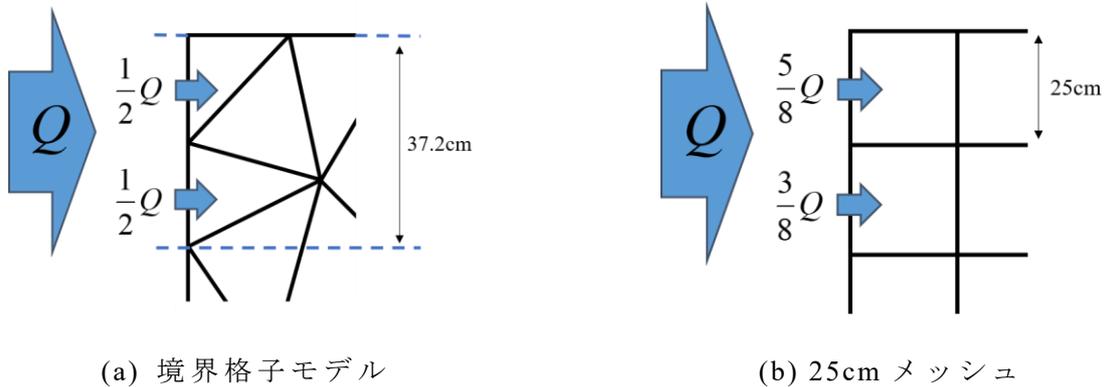


図 3.7 流入流量 Q の与え方

3.5 計算結果

すべてのケースにおいて、流入部から水が流れ込み始めた時刻を 0 とする。また、以下に説明する図はすべて章末にて提示する。

計算結果のうち、流入開始 10, 20, 30, 40, 50, 60 秒後の対象領域全体の水深・氾濫域を図 3.8～図 3.22 に示す。また、実験での超音波変位計位置に重なる格子における水深の時間変化を図 3.23～図 3.37 に示す。なお図 3.8～図 3.22 では、位置の把握のために実験で用いた街区および建物模型と越流堰の位置を重ねて表示し、図 3.23～図 3.37 の凡例に用いた番号は実験の超音波変位計の位置に対応している。

3.5.1 境界浸水モデル

図 3.8～図 3.10 から、境界浸水モデルを用いた計算によって、建物に接する水深が一定の高さになったら建物に浸水する様子が表現されていることが分かる。Sim-A1, Sim-A2, Sim-A3 のいずれにおいても、流入開始から 60 秒間で浸水した建物は領域の左側に偏っており、流入部から流下方向への流れが大きかったことが分かる。横断方向の流れはあるものの、最も流入流量の小さな Sim-A1 では右端の道まで氾濫水が到達することはなかった。このことは図 3.23 で s2 の水深は 0 のままであったことから確認できる。Sim-A2 と Sim-A3 では右端まで氾濫流が及んではいるが、水深が低いため流入開始 60 秒間で街区 8, 12 の建物はほとんど浸水しなかった。このことは図 3.24, 図 3.25 で s2 と s6 の水深が建物浸水の条件である 7mm に達していない、もしくは達するのが遅いことから明らかである。

3.5.2 国交省モデル

図 3.11～図 3.17 から、建物を抵抗として氾濫流が流れる様子が確認できる。いずれのケースでも、流入開始 10 秒の時点で右端まで氾濫流が到達したが、そこから流下す

る際に建物の密集する市街地領域の中央部へはあまり流れ込まず, 太い道路がある市街地領域の両端を流下方向に進む流れが大きくなった. Sim-BL1 以外のケースでは市街地領域の左右の太い道に沿って下る流れが確認された. Sim-BL1 では右端の道を下る流れはあまり大きくなく, 左端の道に沿う流れが大きかった.

3.5.3 格子内浸水モデル

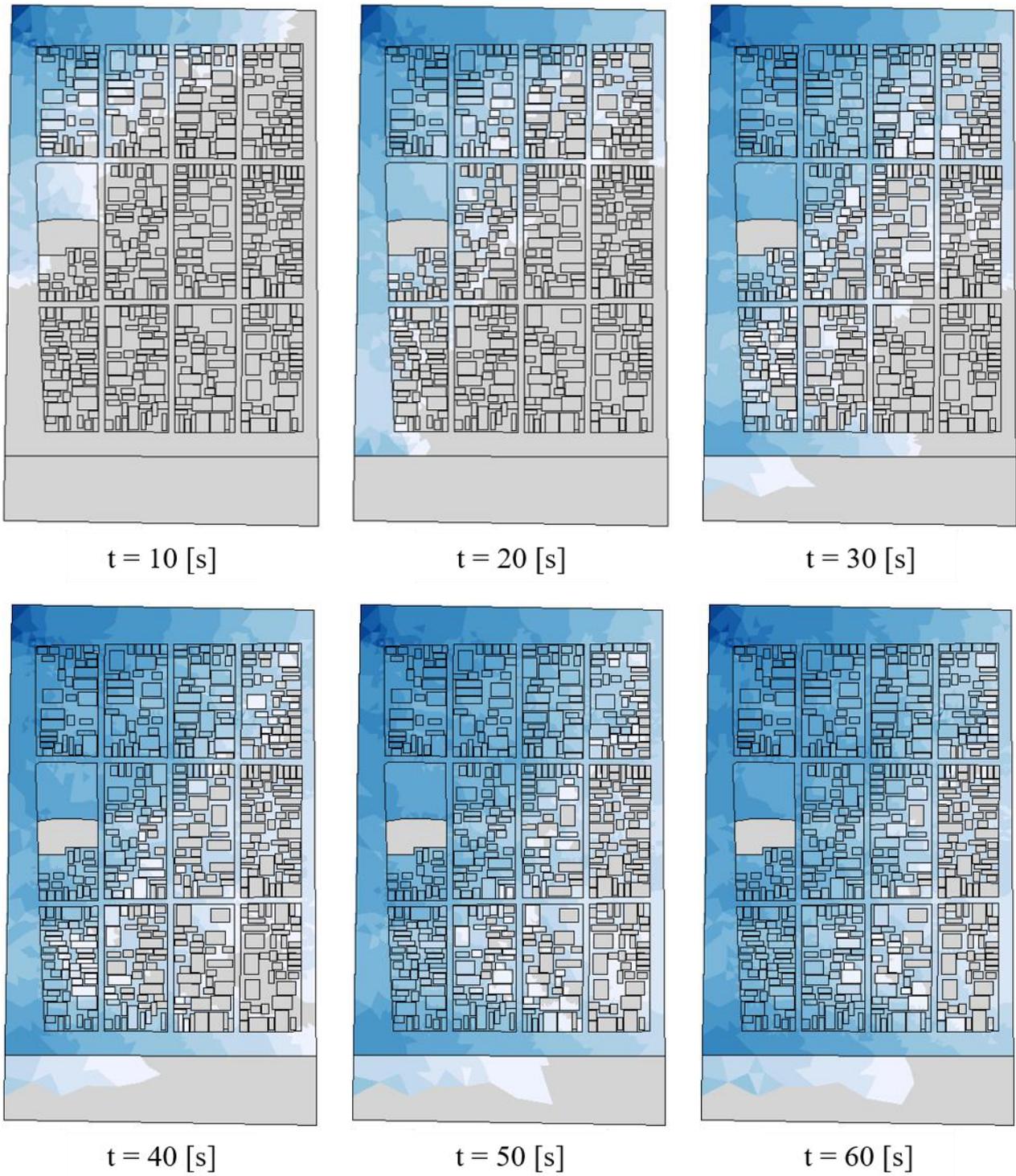
格子内に空隙率と抗力係数を適用する点は国交省モデルと同じであるため, 格子内浸水モデルも同様に, 両端の道に沿う流下方向の流れよりも市街地領域の中央部を下る流れが遅くなる様子は図 3.18～図 3.24 で確認された.



図 3.8 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-A1)



図 3.9 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-A2)



Water depth [m] 0.002 0.004 0.006 0.008 0.01 0.012 0.014 0.016 0.018 0.02 0.022

図 3.10 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-A3)

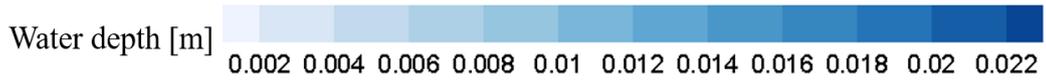
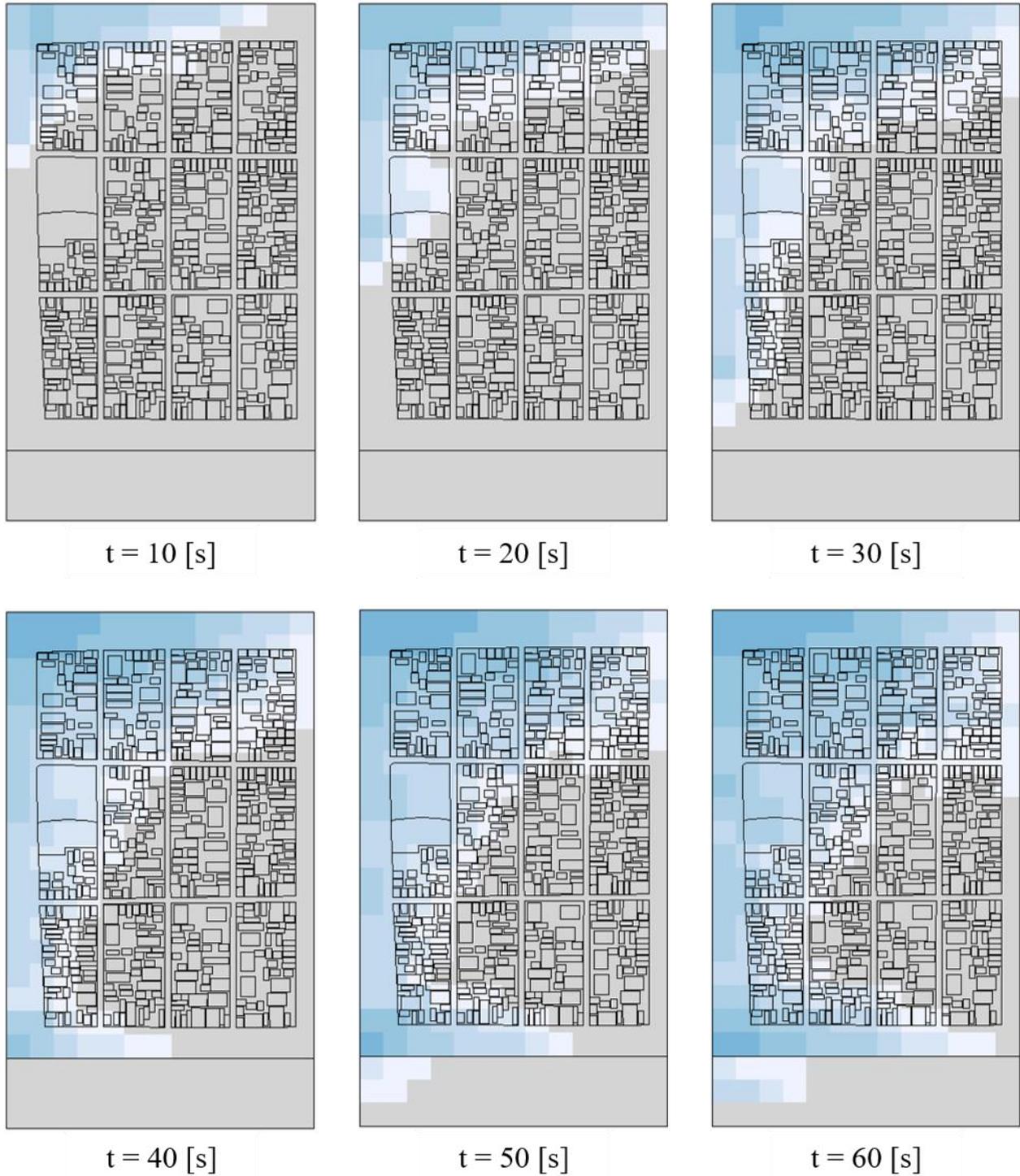


図 3.11 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-BL1)

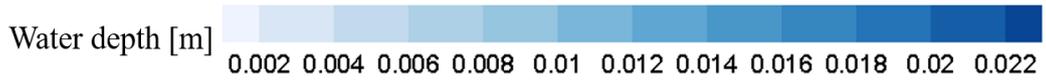
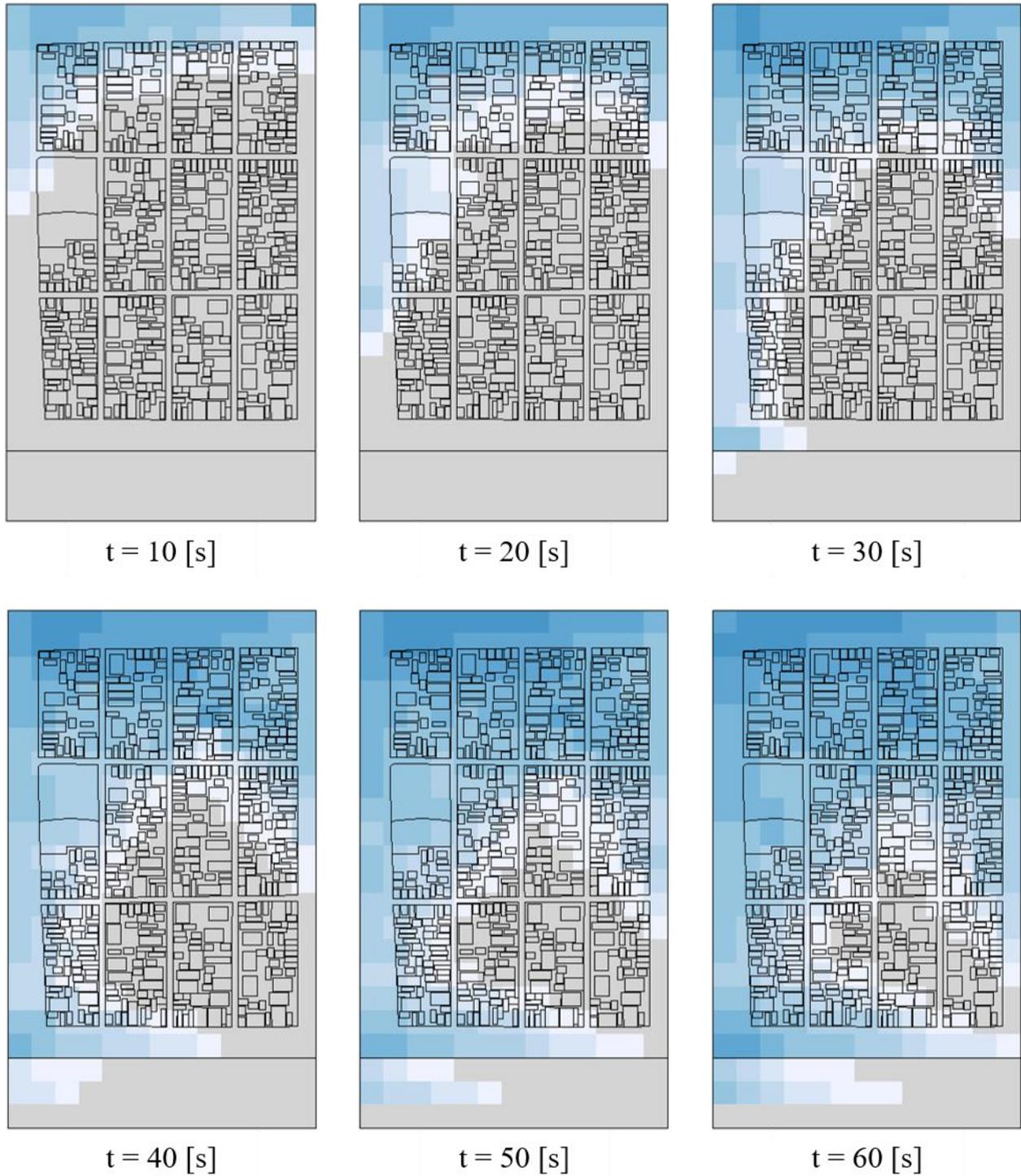


図 3.12 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-BL2)

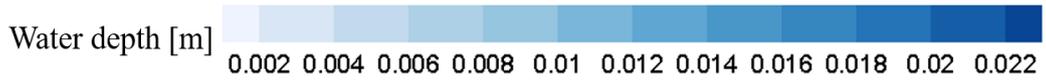
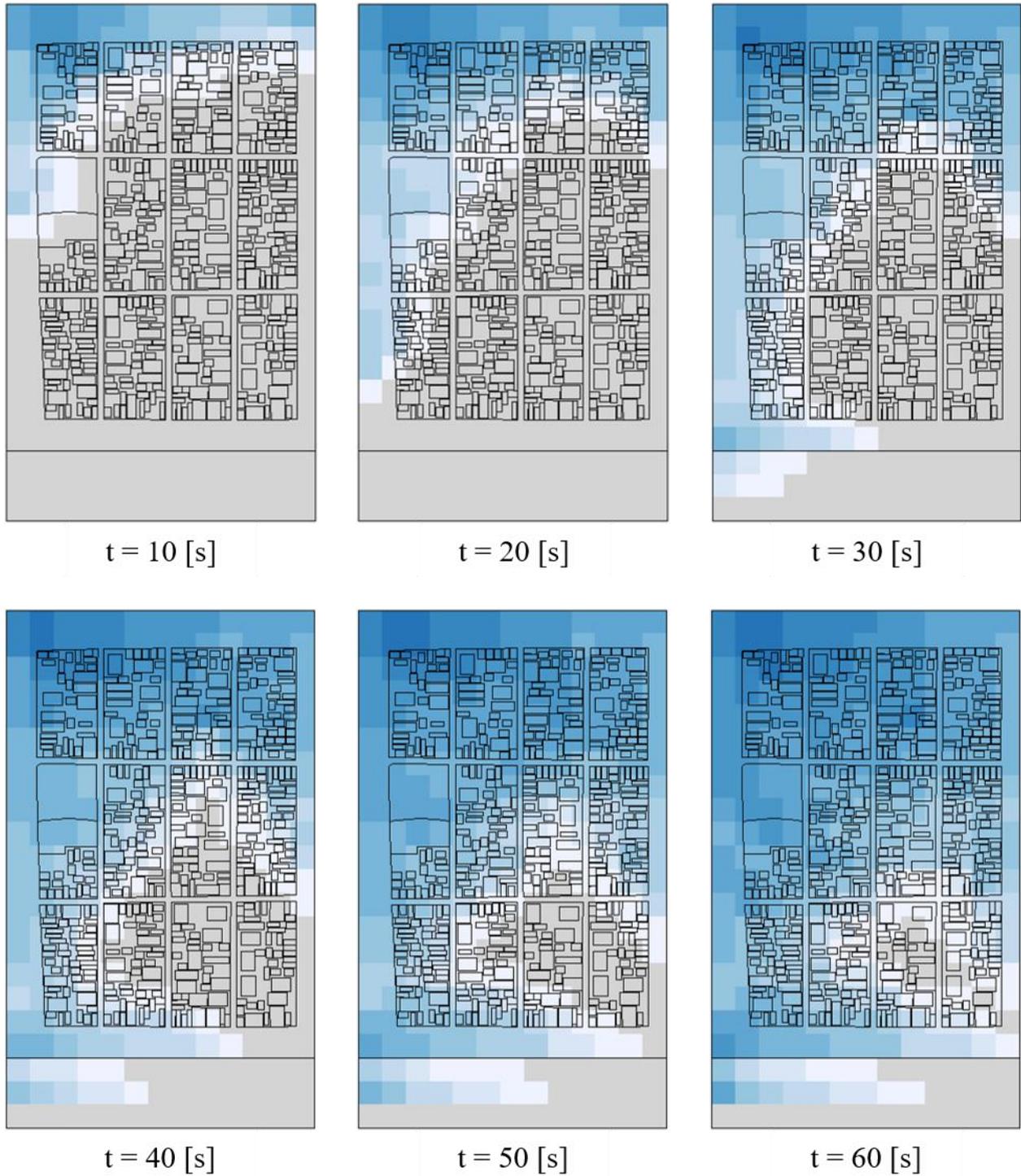


図 3.13 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-BL3)

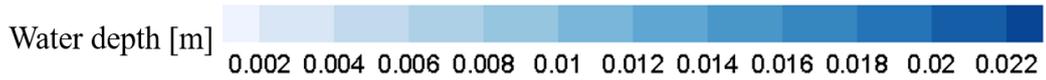
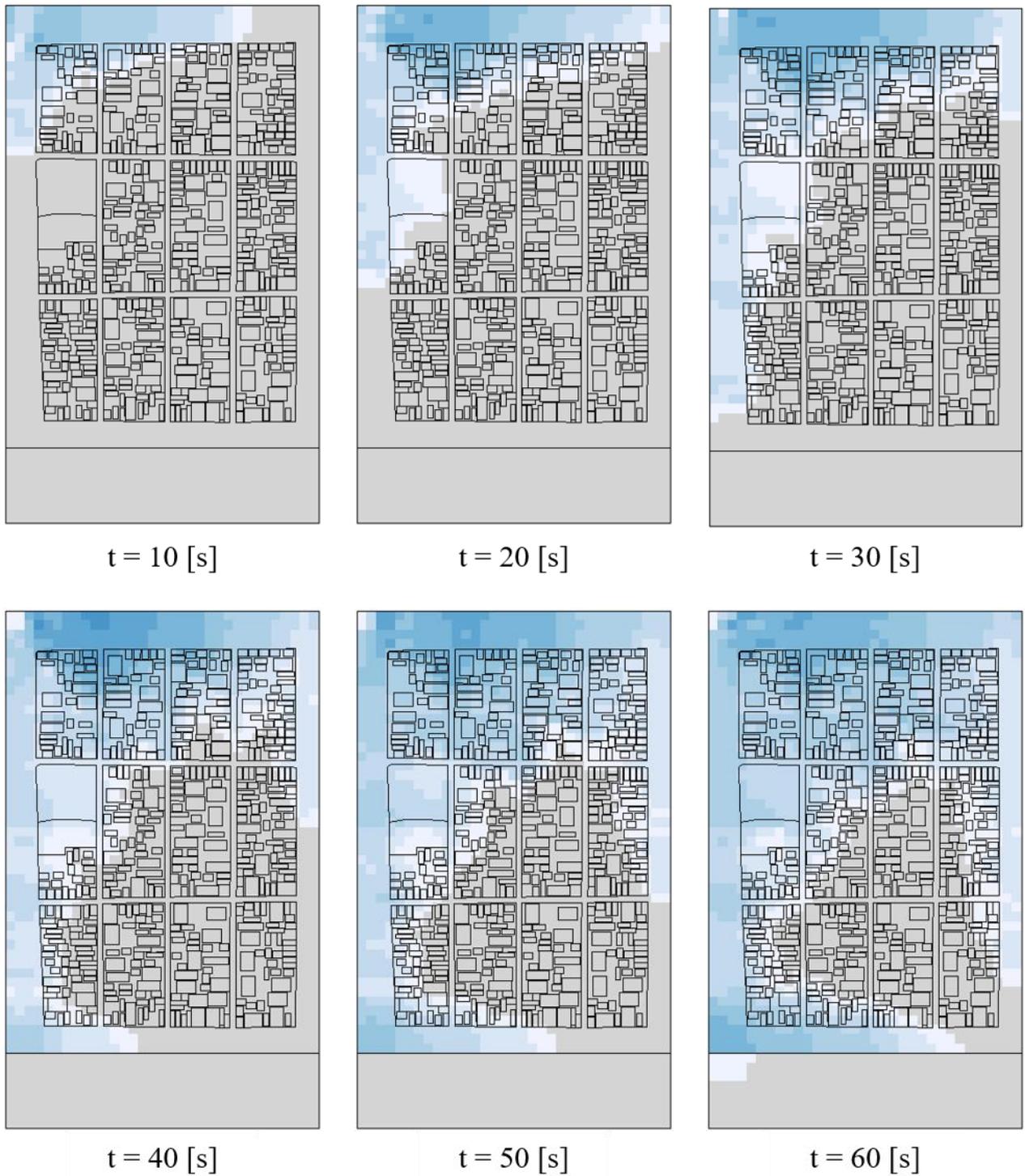
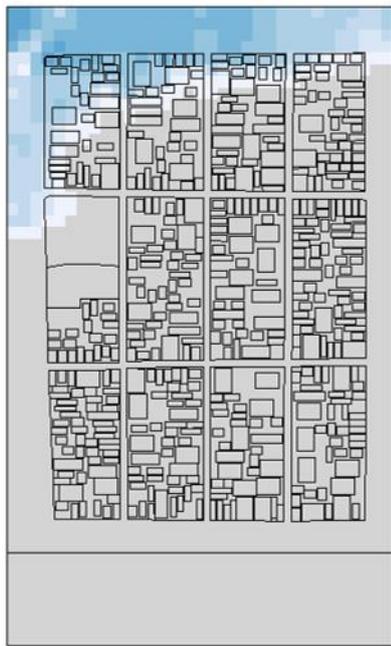
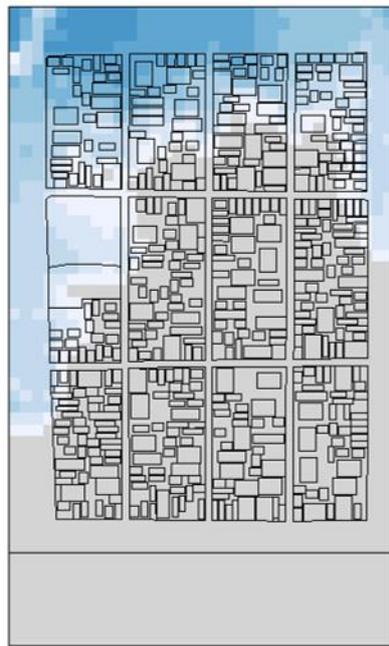


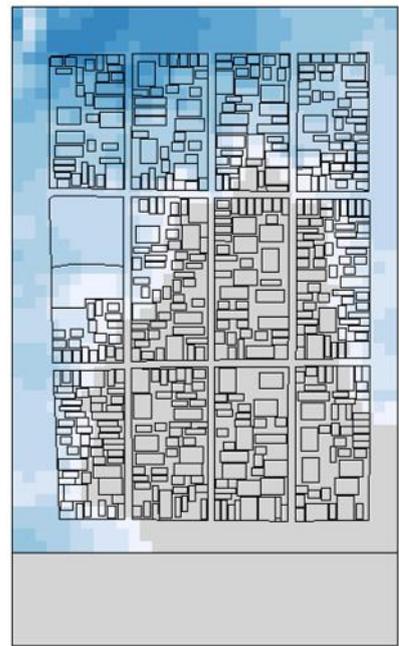
図 3.14 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-BS1)



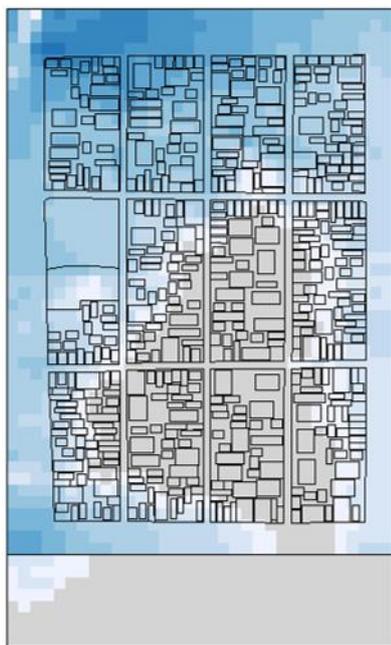
t = 10 [s]



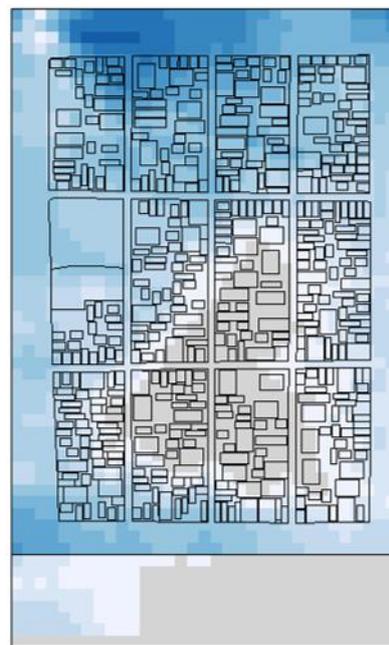
t = 20 [s]



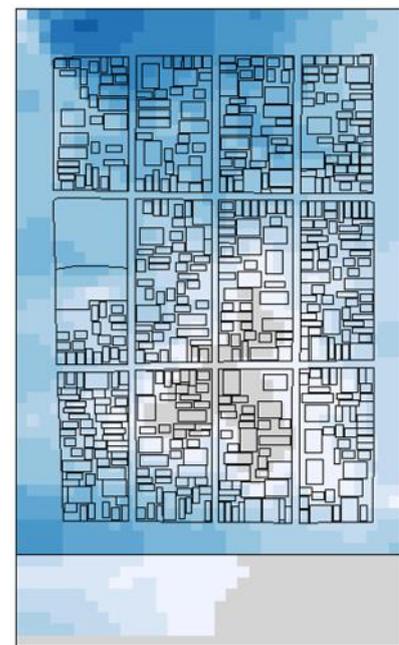
t = 30 [s]



t = 40 [s]



t = 50 [s]



t = 60 [s]

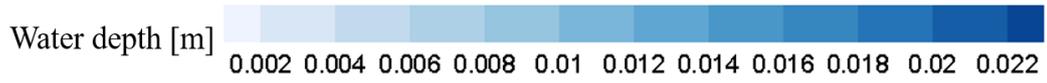


図 3.15 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-BS2)

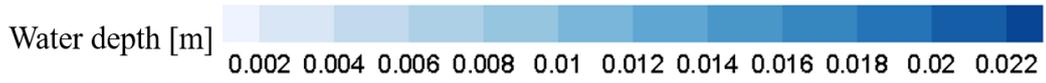
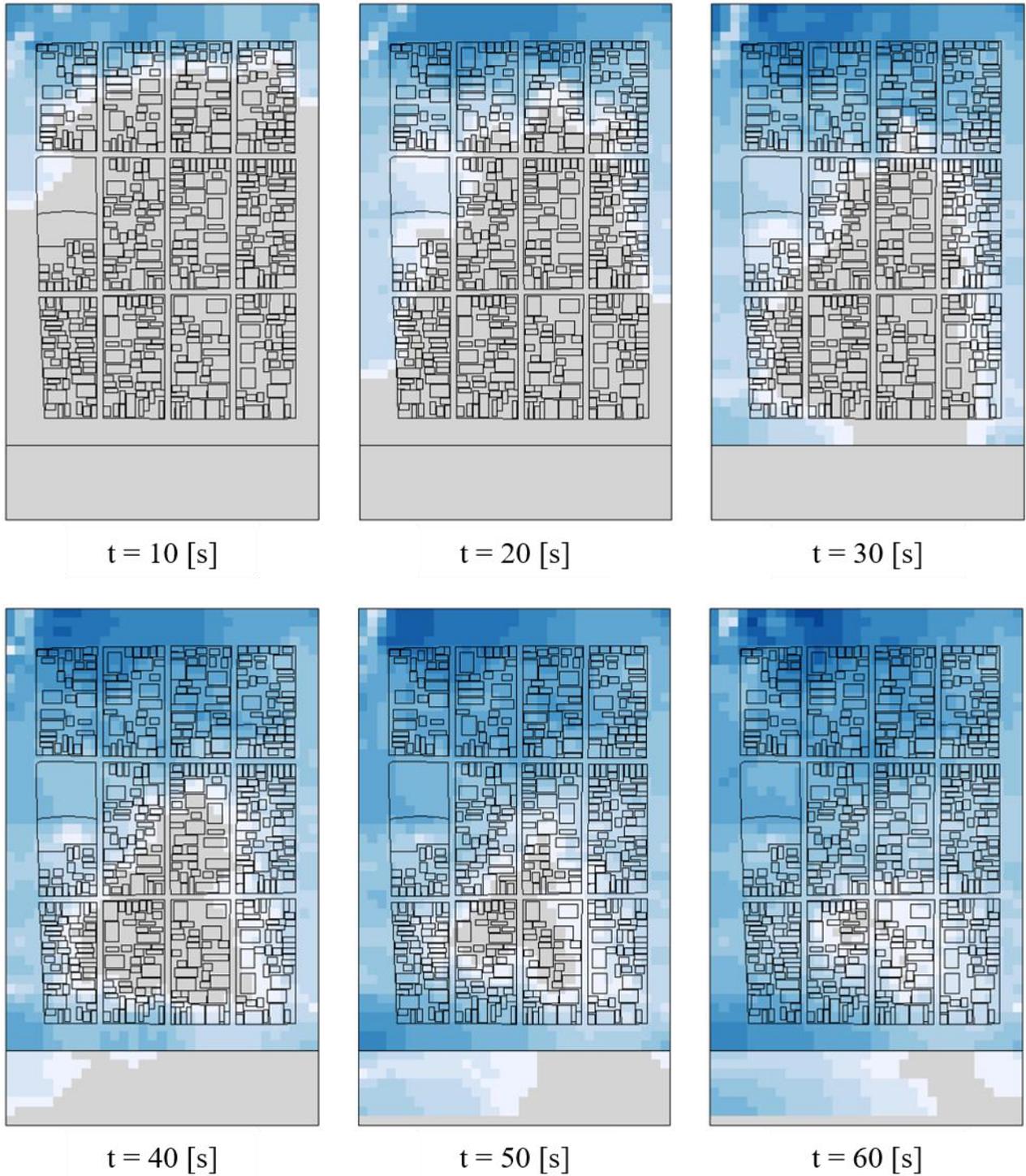


図 3.16 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-BS3)

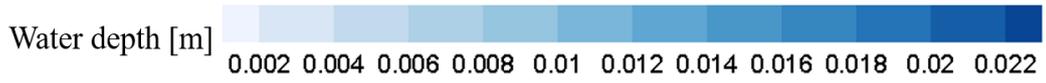
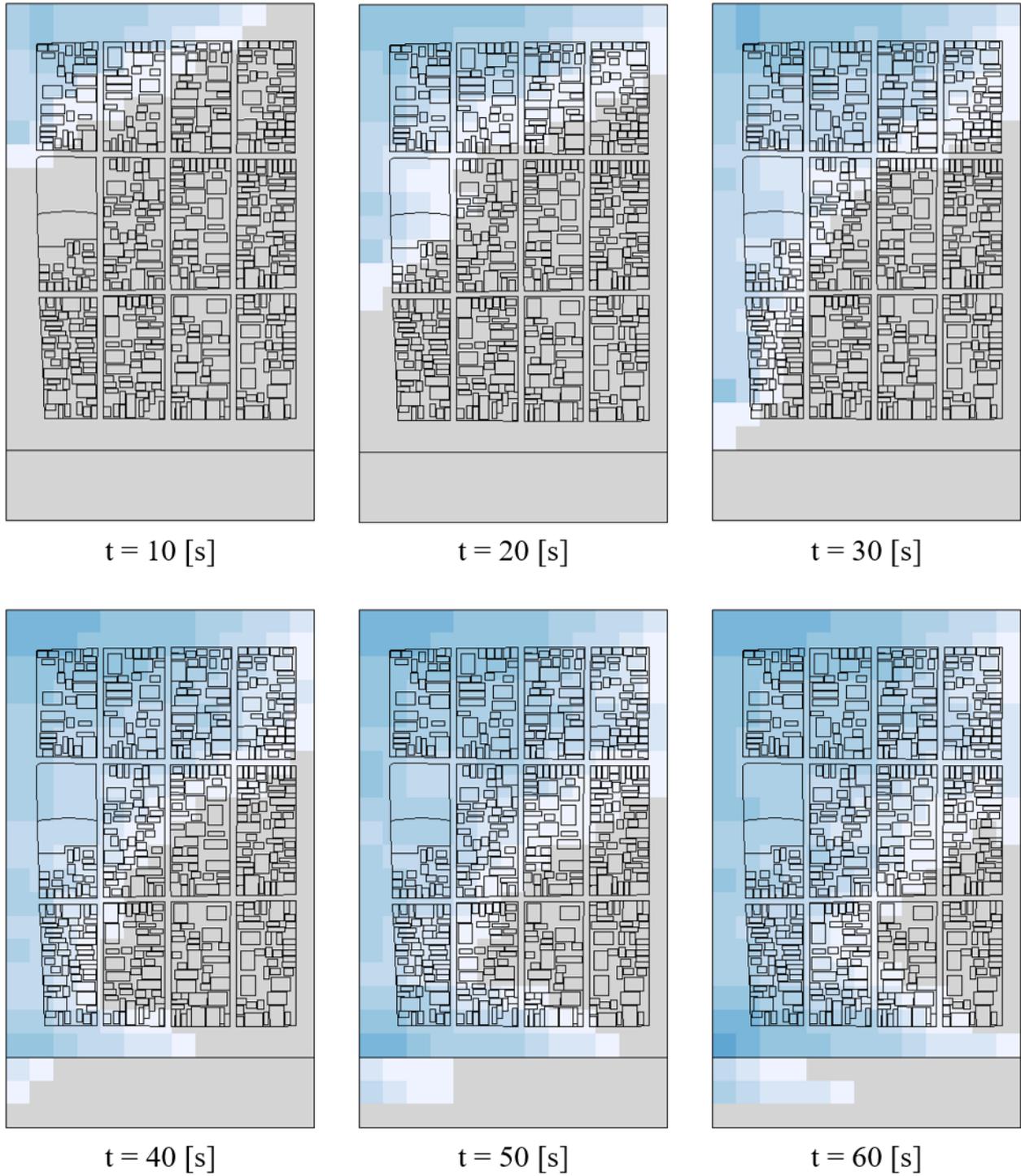
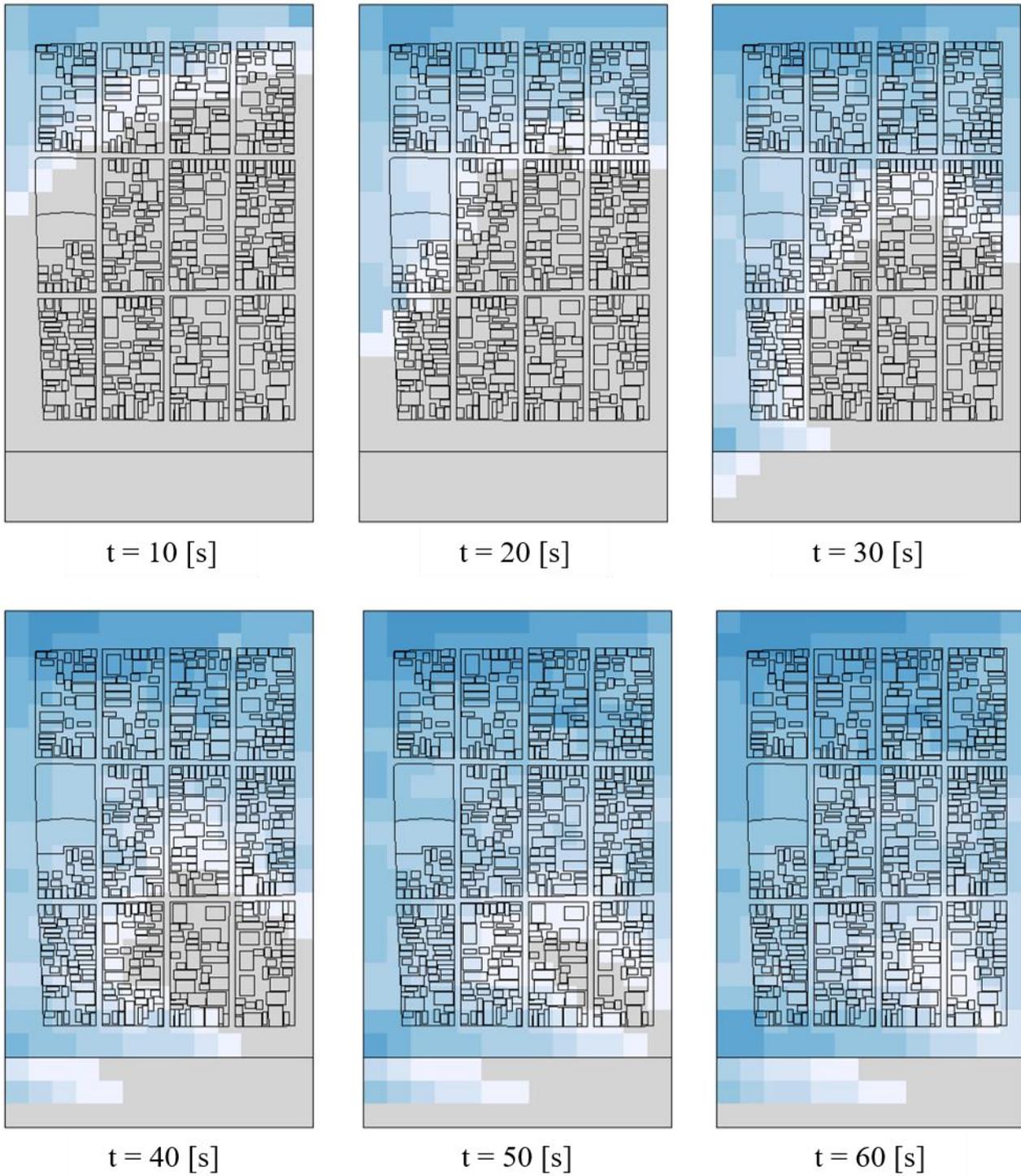


図 3.17 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-CL1)



Water depth [m] 0.002 0.004 0.006 0.008 0.01 0.012 0.014 0.016 0.018 0.02 0.022

図 3.18 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-CL2)

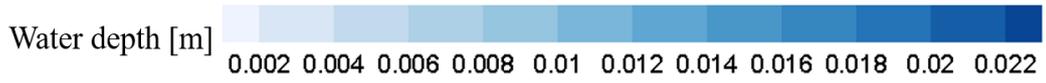
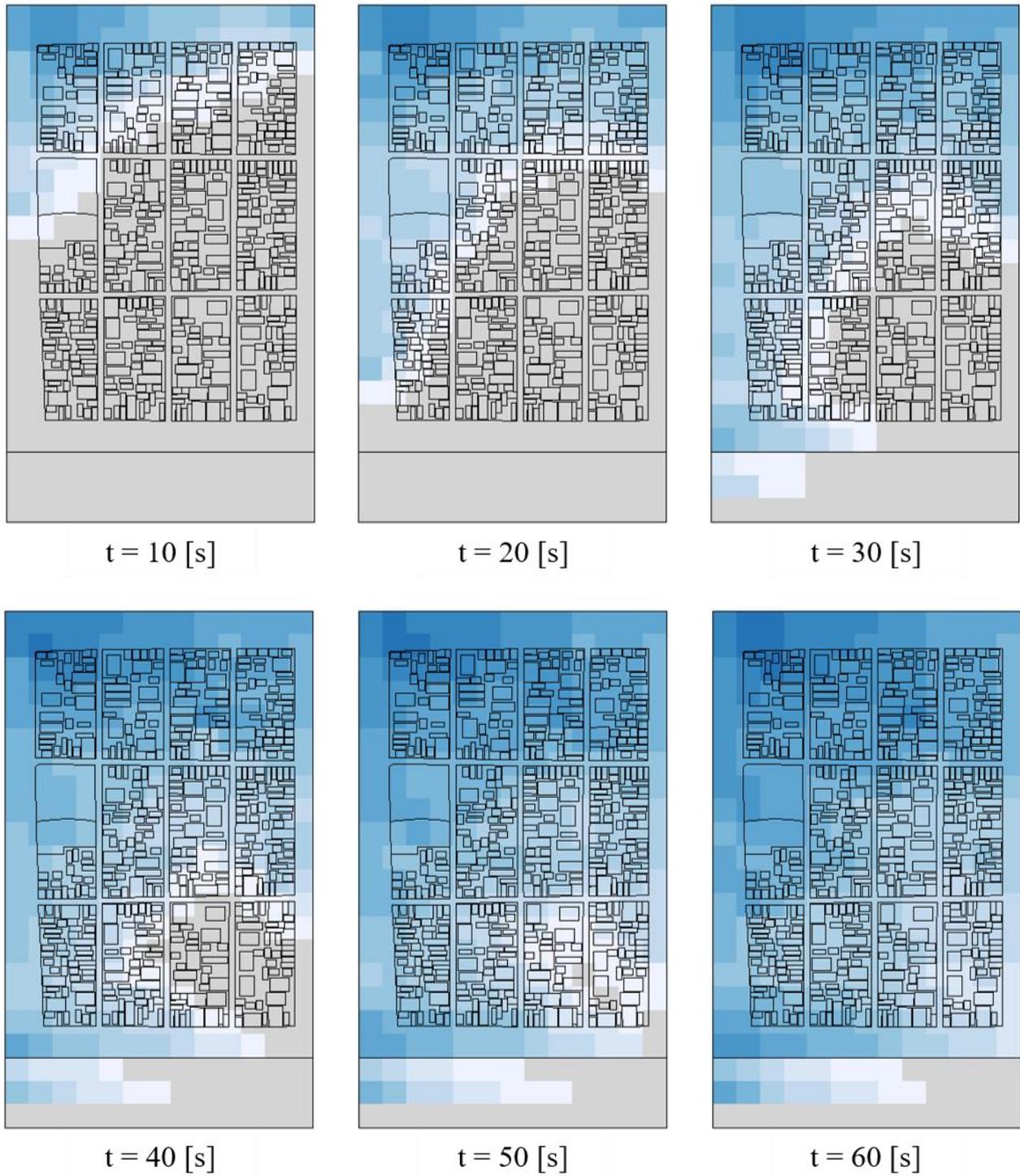
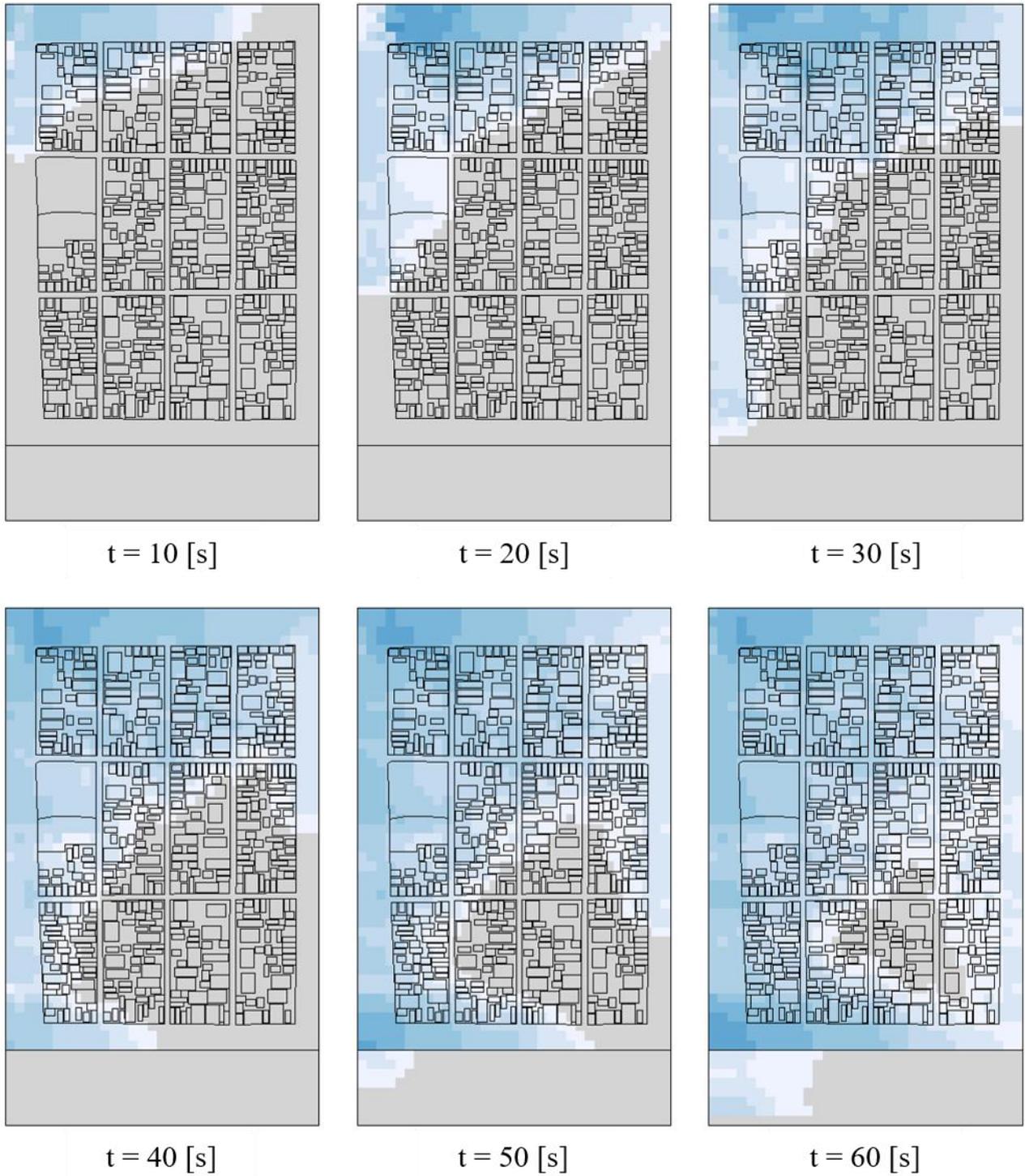


図 3.19 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-CL3)



Water depth [m] 0.002 0.004 0.006 0.008 0.01 0.012 0.014 0.016 0.018 0.02 0.022

図 3.20 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-CS1)

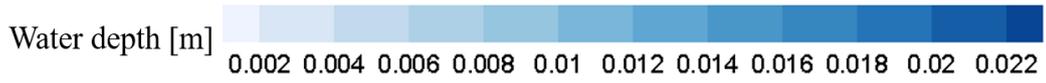
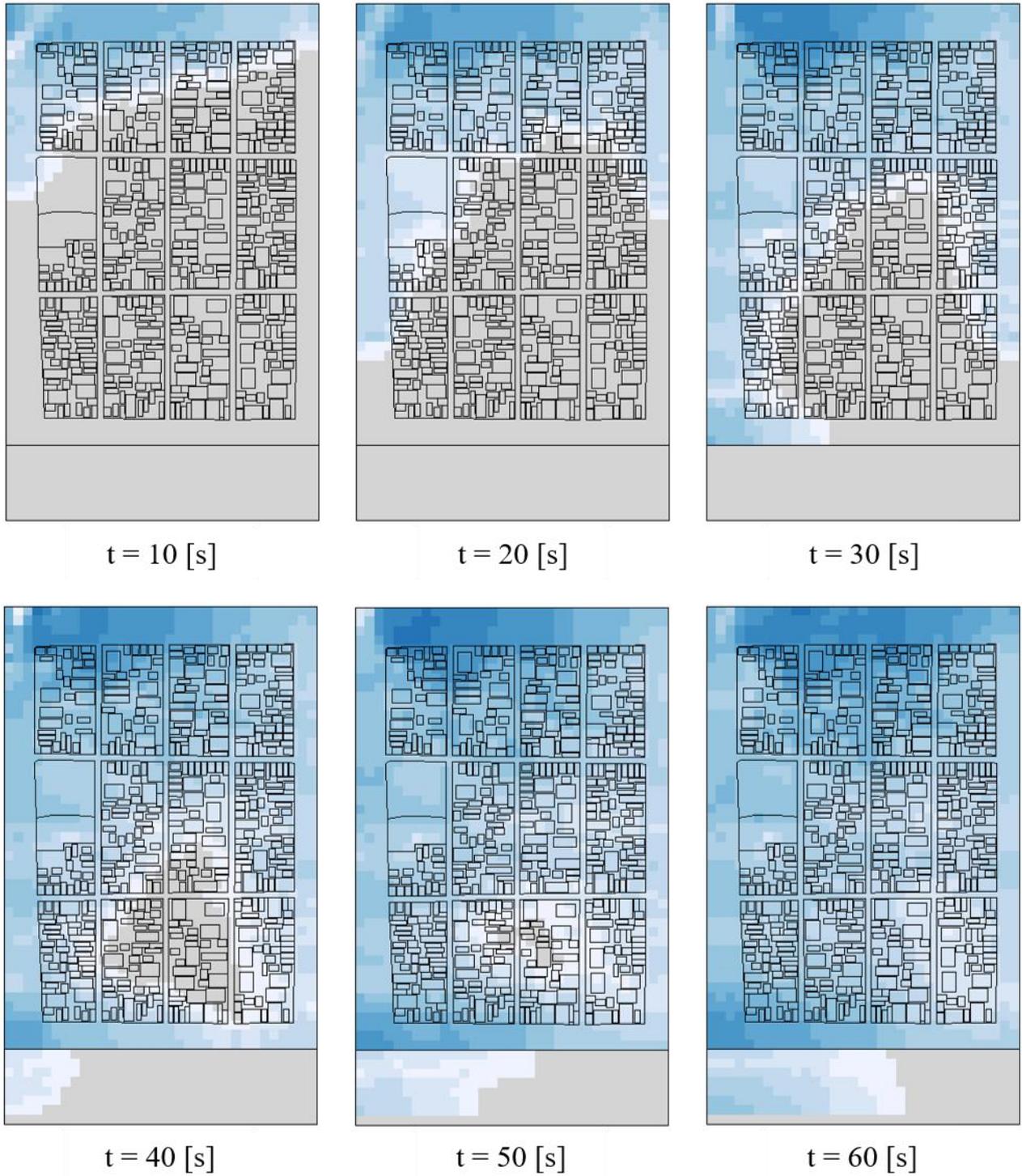
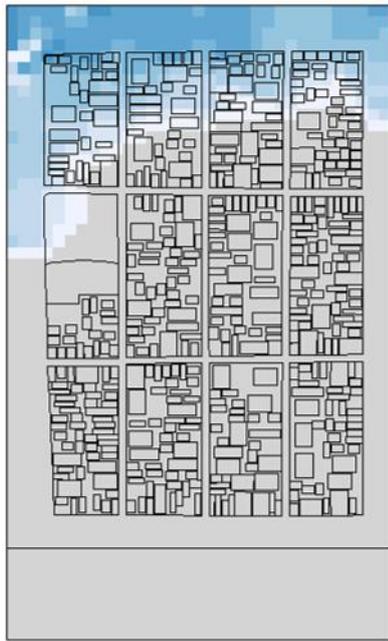
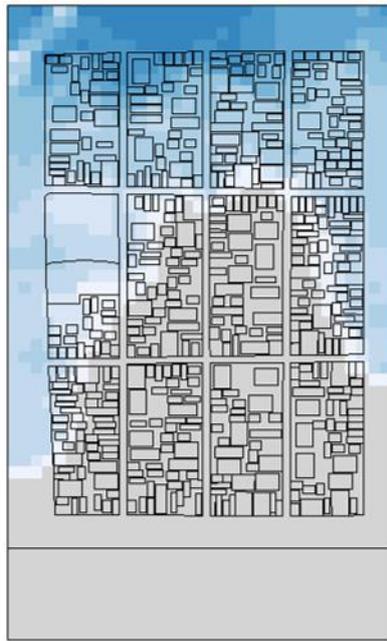


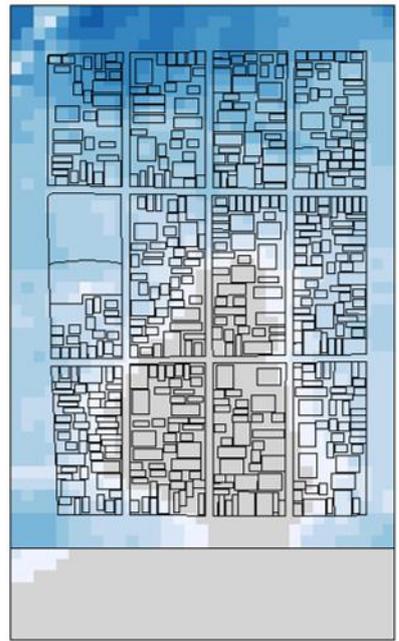
図 3.21 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-CS2)



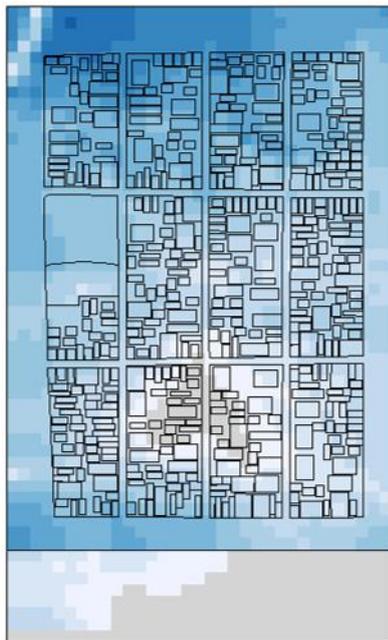
t = 10 [s]



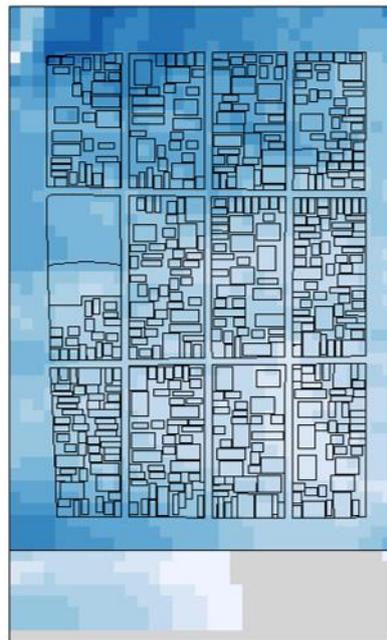
t = 20 [s]



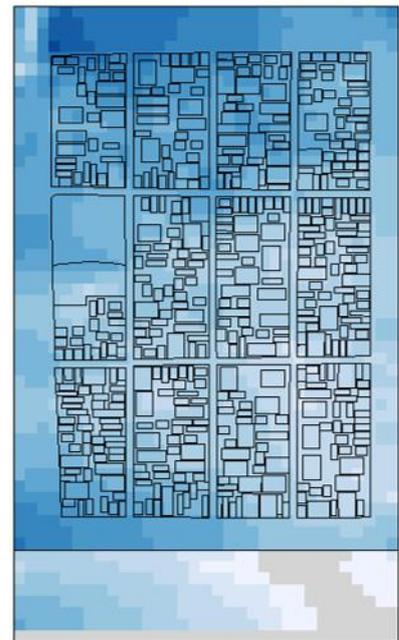
t = 30 [s]



t = 40 [s]



t = 50 [s]



t = 60 [s]

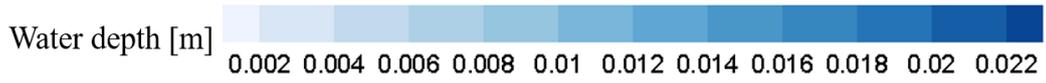


図 3.22 対象領域全体の水深・氾濫域 (Sim-CS3)

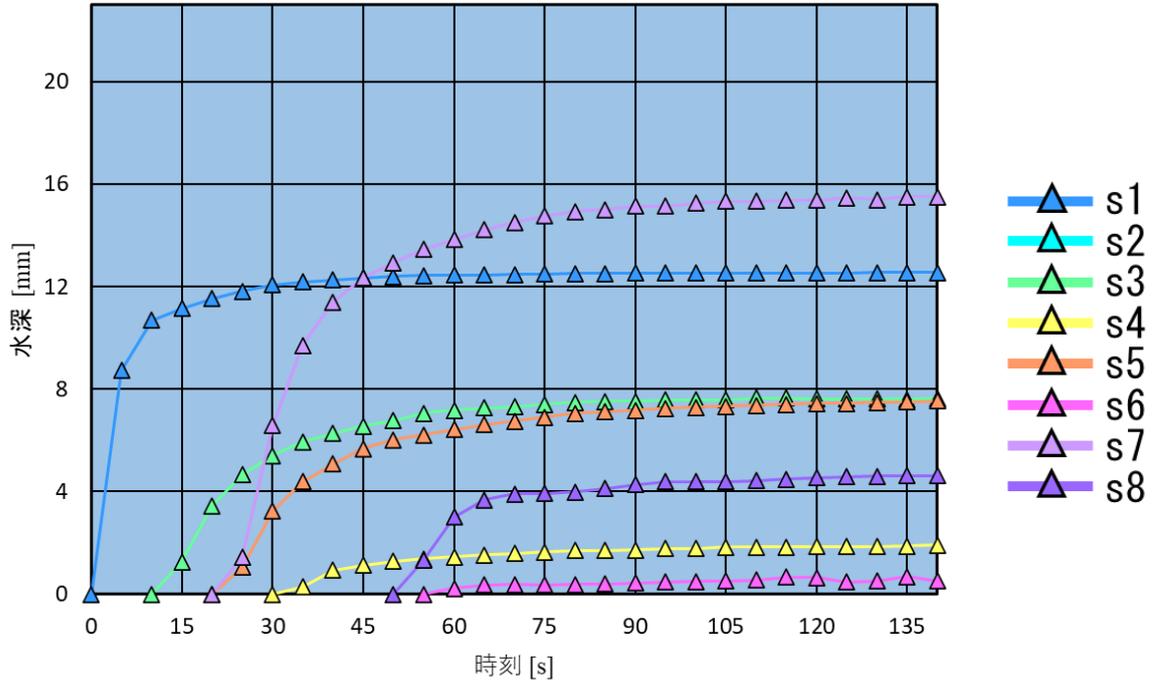


図 3.23 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-A1)

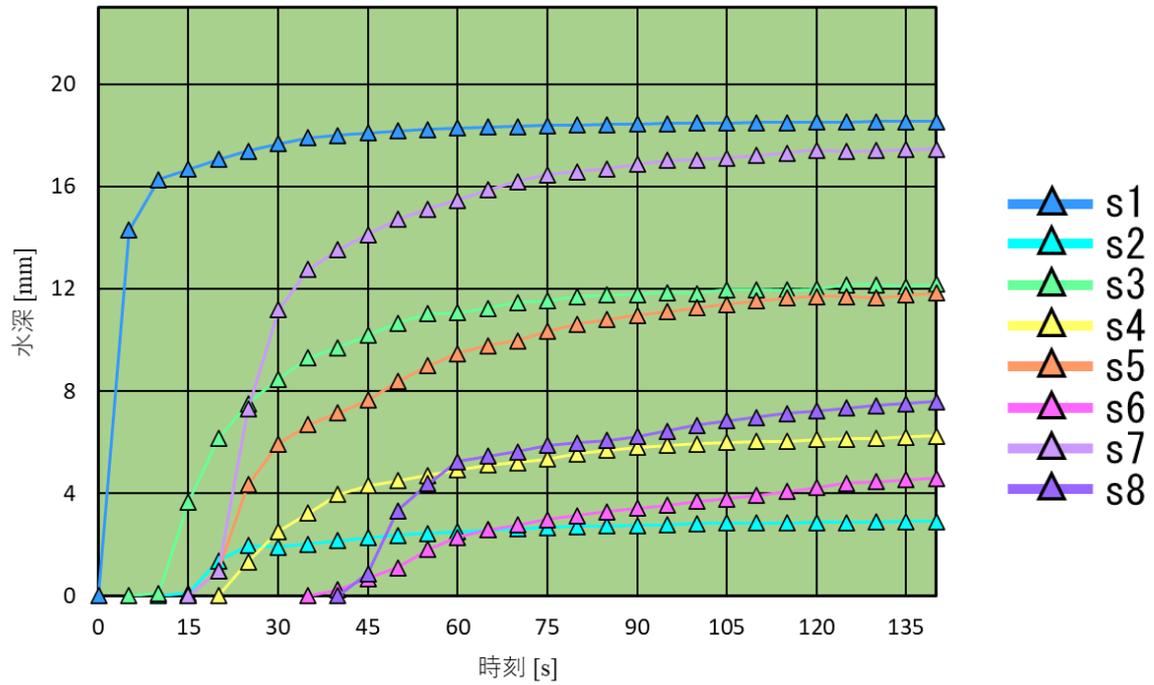


図 3.24 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-A2)

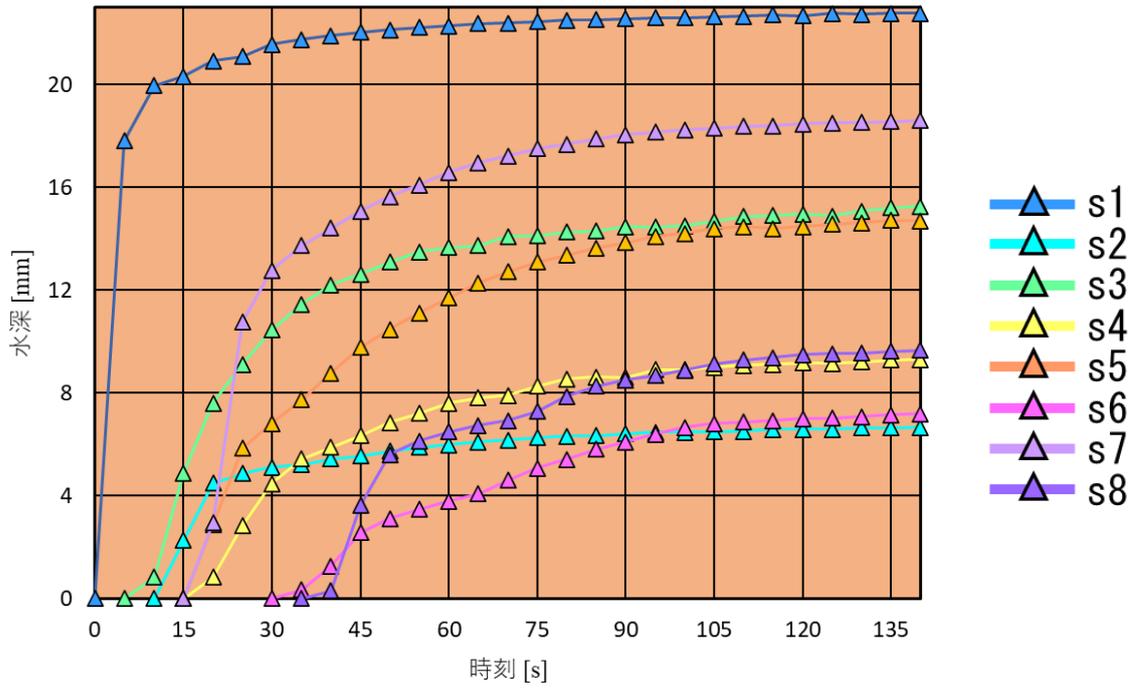


図 3.25 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-A3)

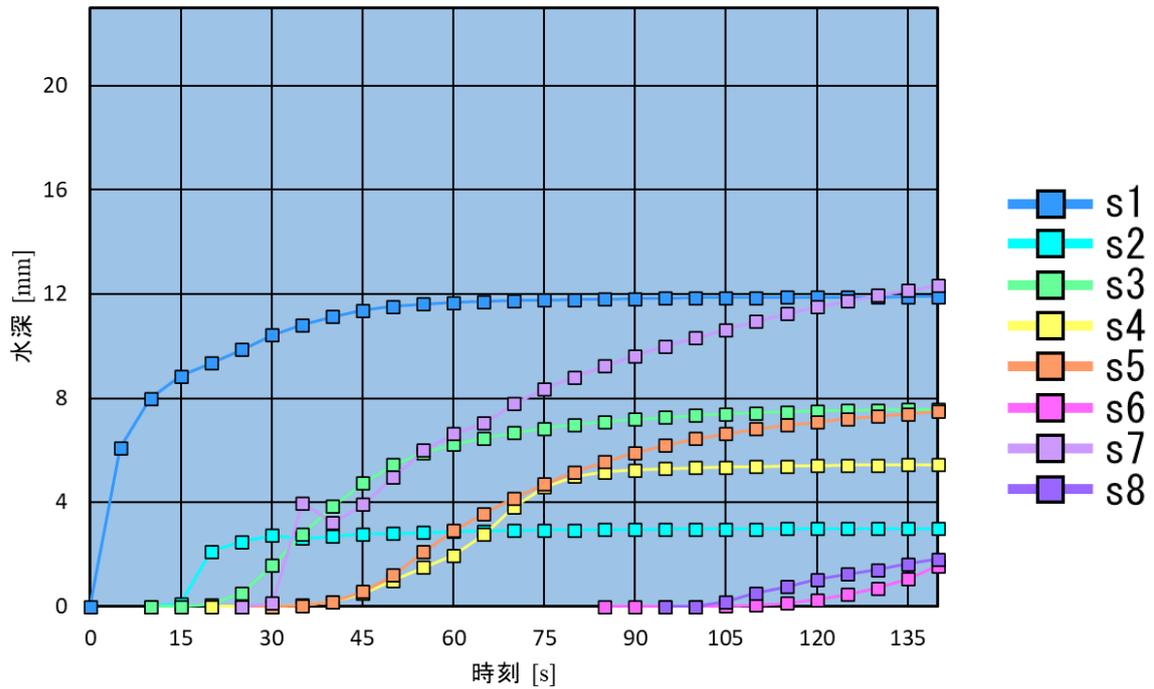


図 3.26 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-BL1)

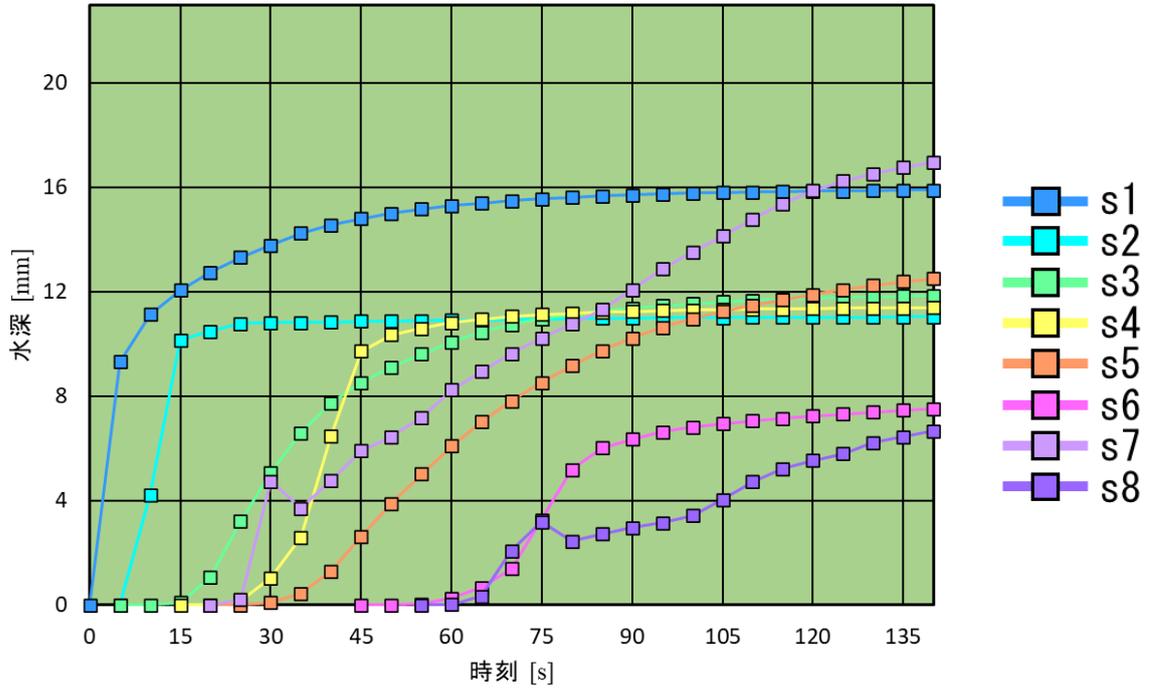


図 3.27 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-BL2)

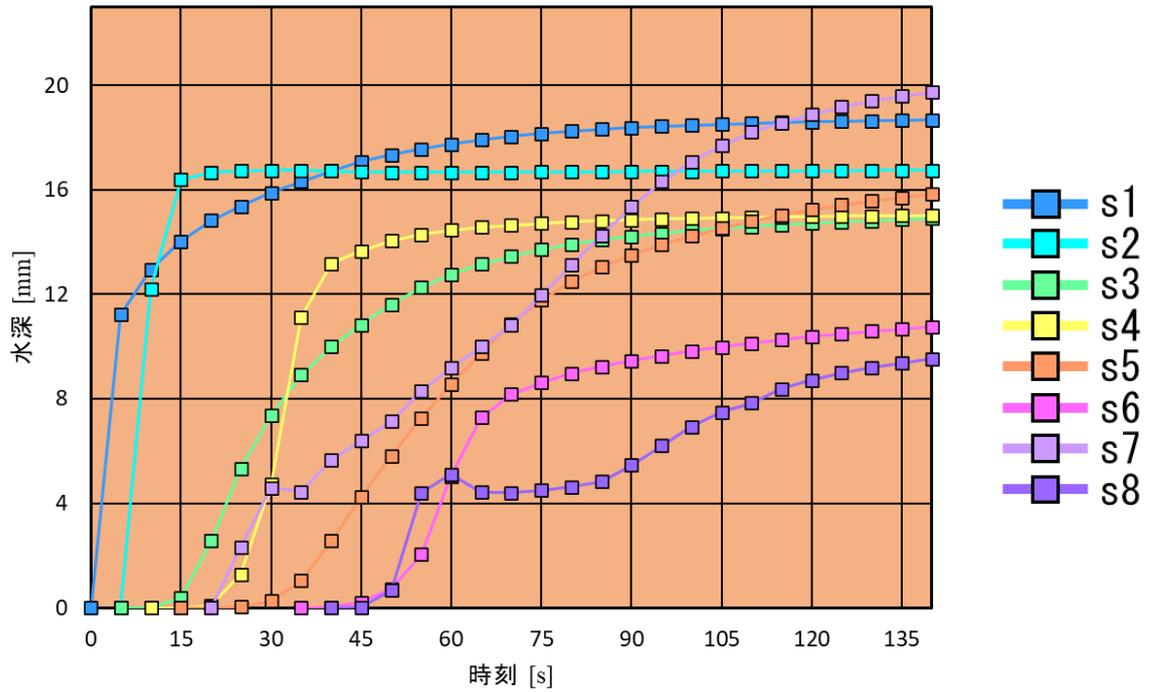


図 3.28 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-BL3)

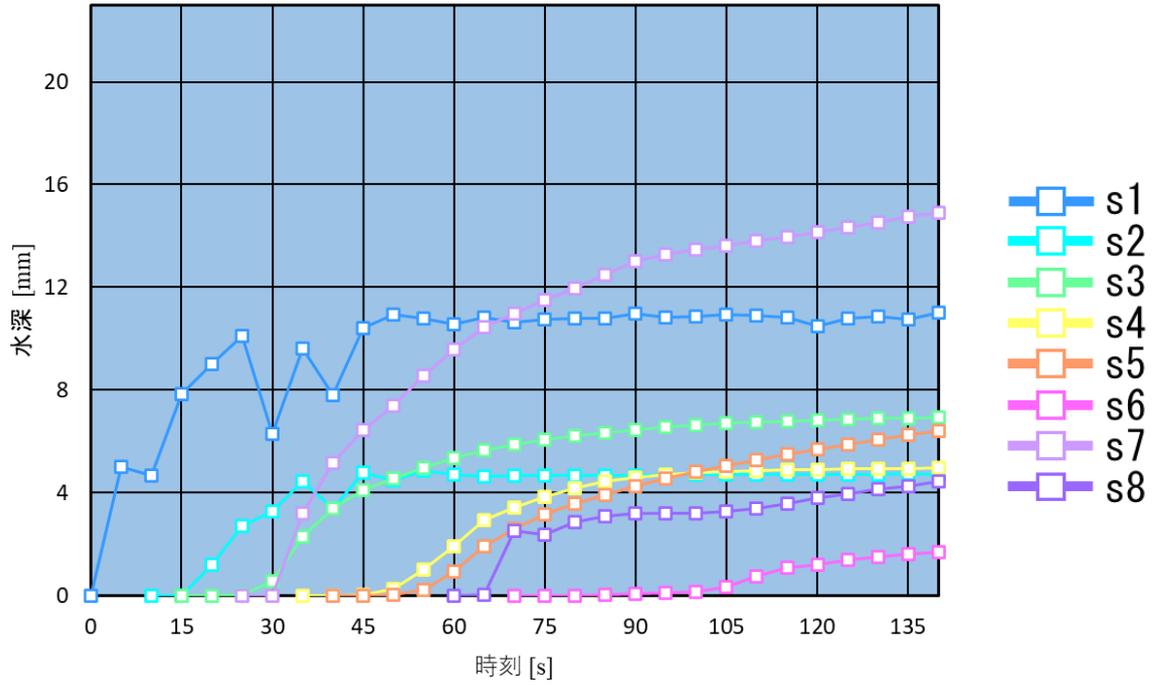


図 3.29 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-BS1)

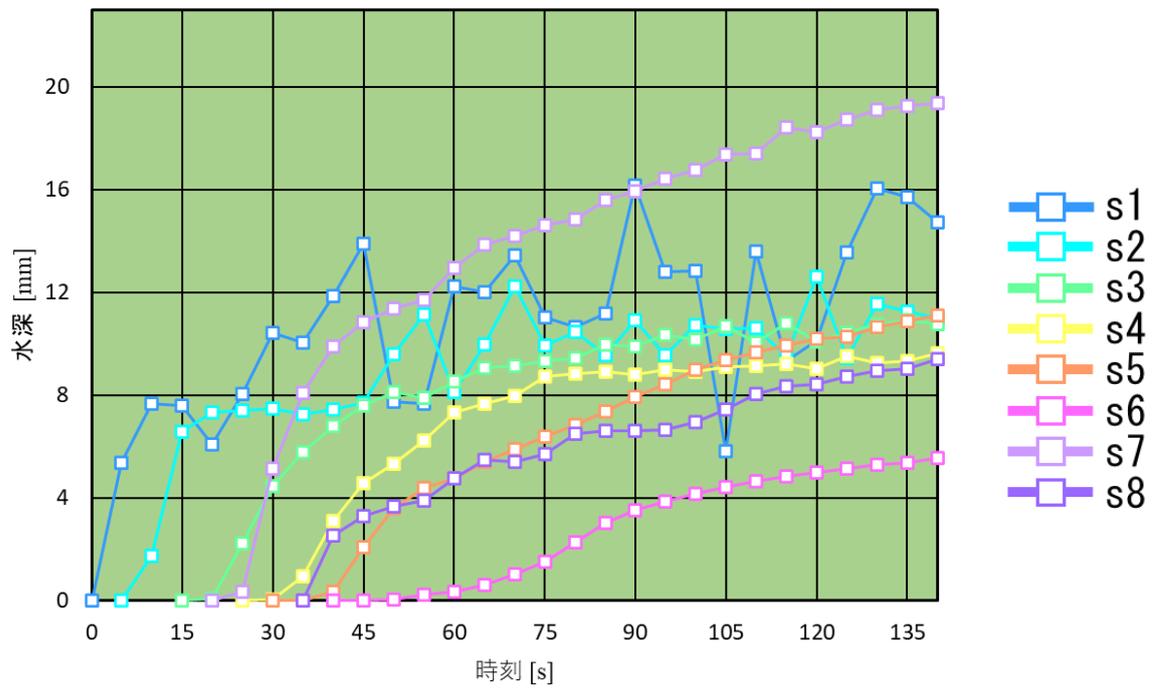


図 3.30 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-BS2)

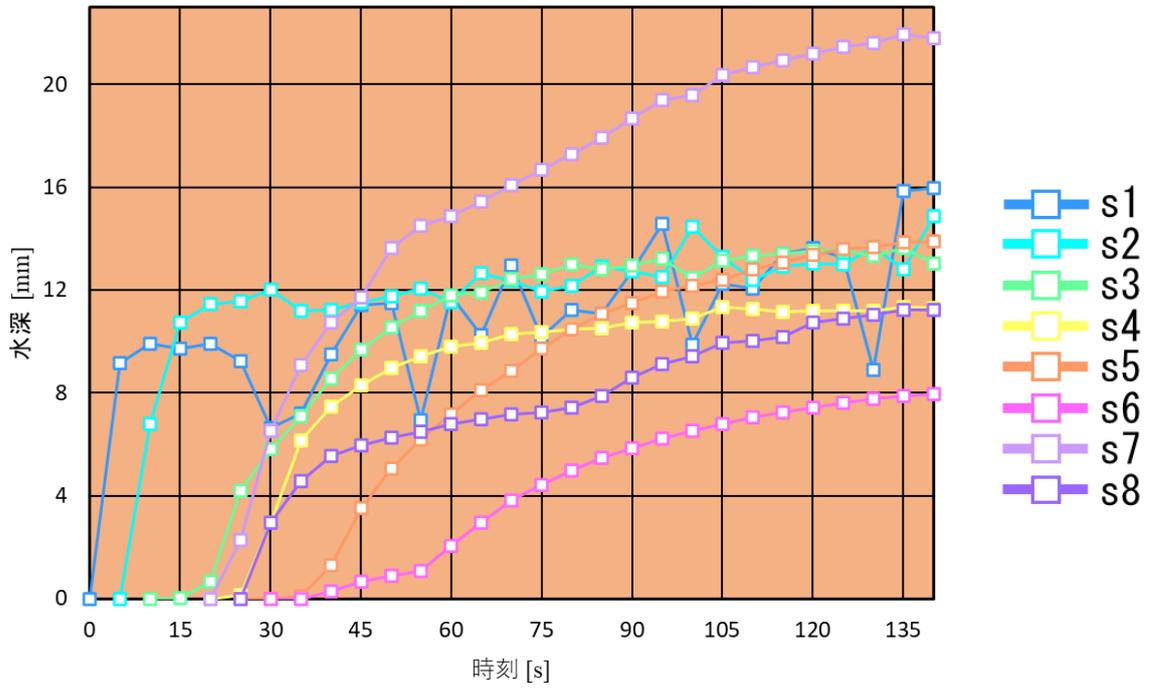


図 3.31 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-BS3)

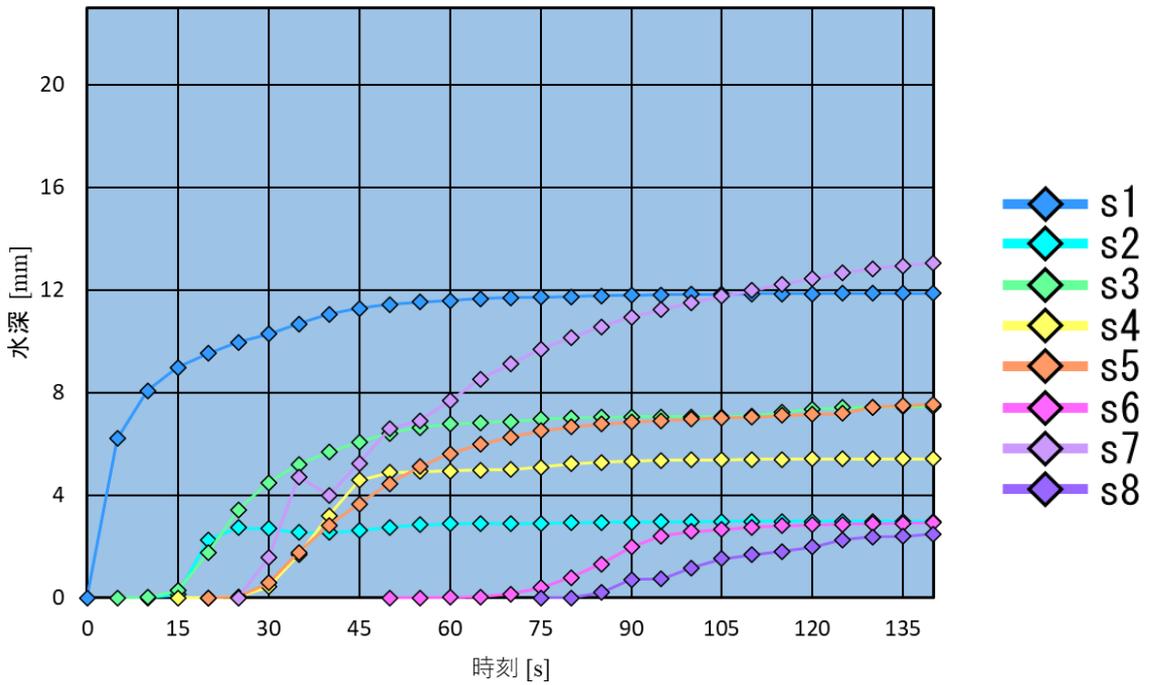


図 3.32 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-CL1)

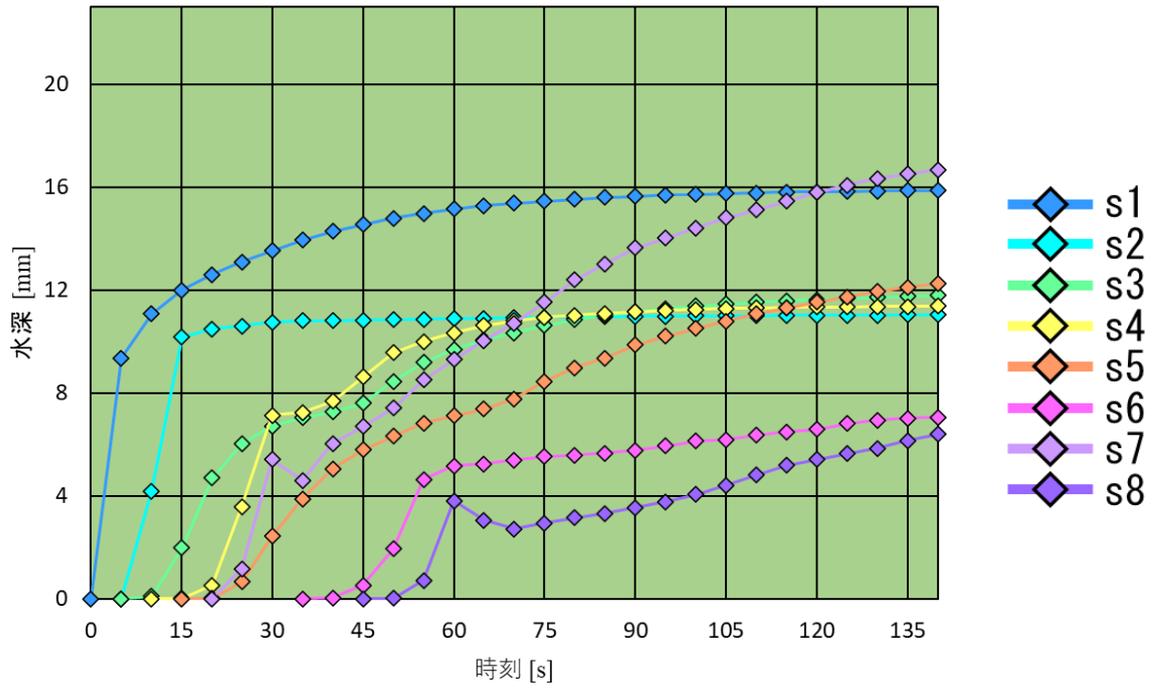


図 3.33 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-CL2)

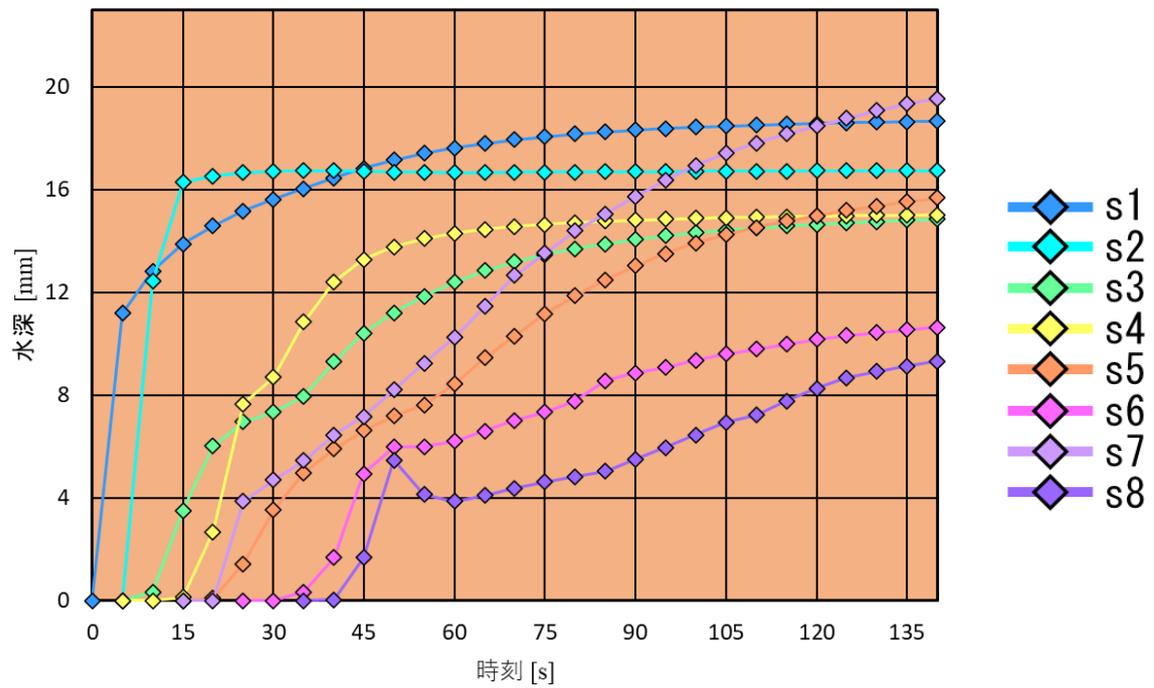


図 3.34 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-CL3)

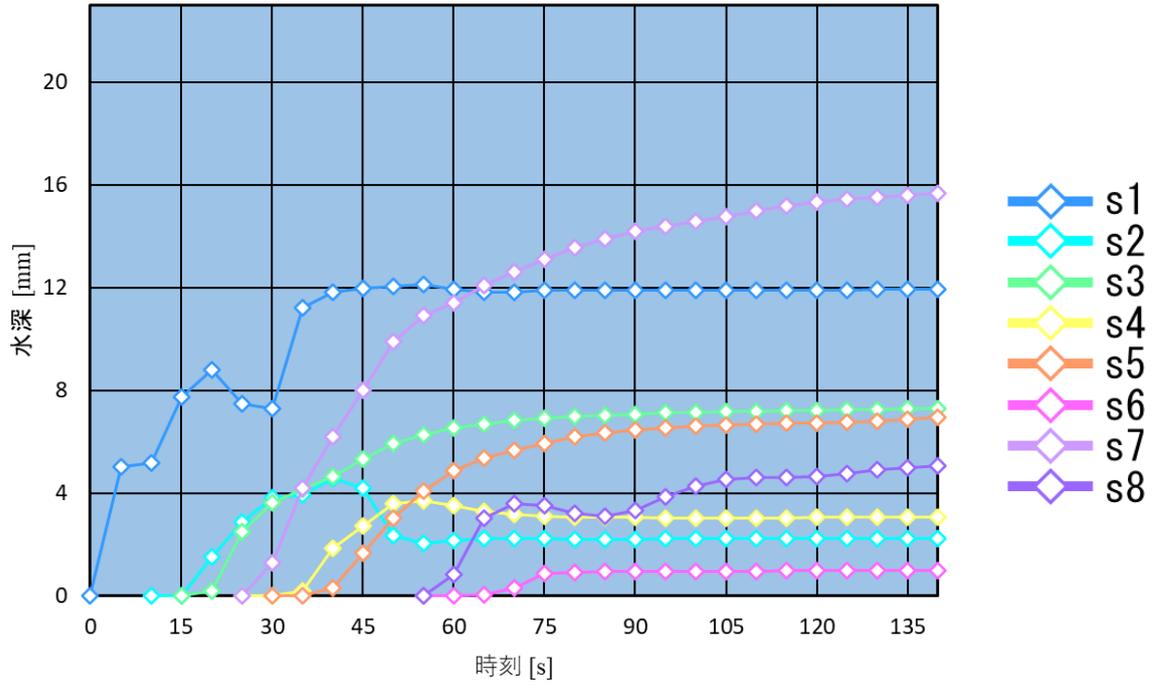


図 3.35 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-CS1)

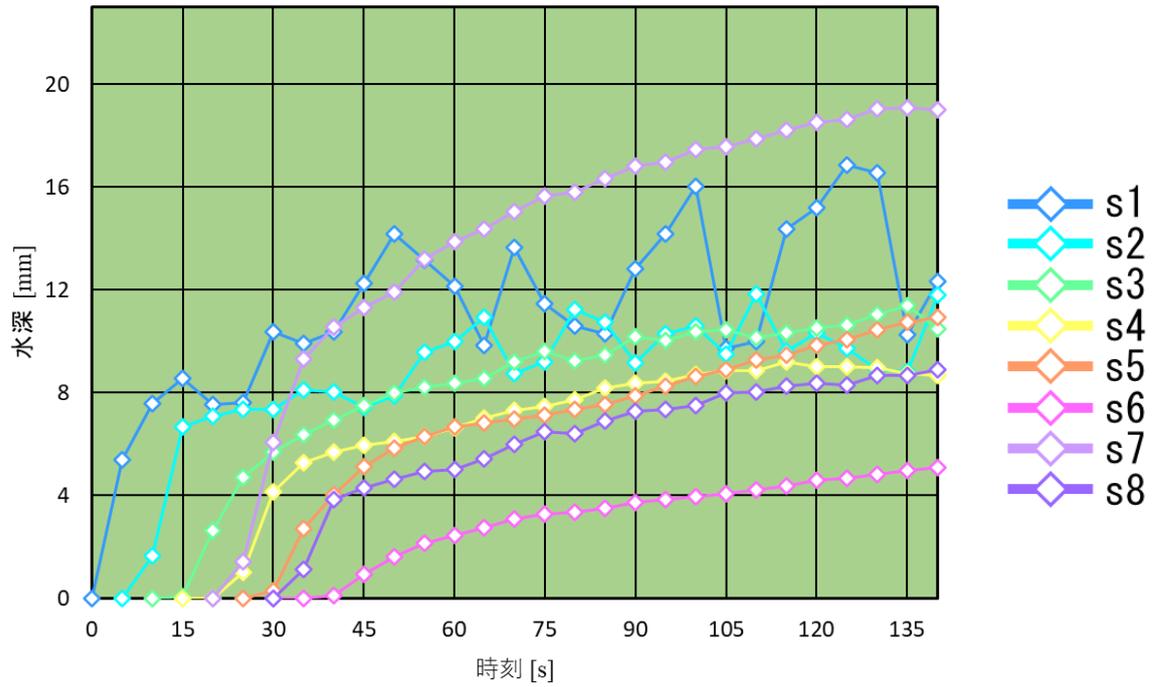


図 3.36 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-CS2)

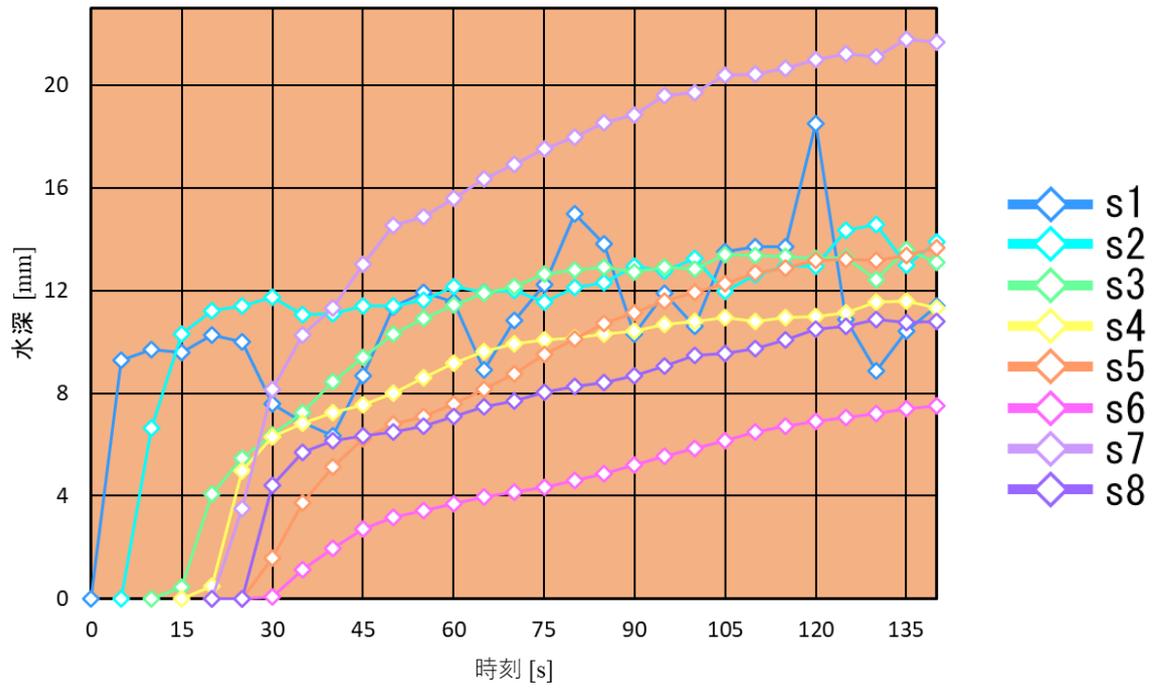


図 3.37 超音波変位計位置の水深の時間変化(Sim-CS3)

第4章 考察

2章で示した実験結果と3章で示した計算結果を踏まえて考察を行う。以降、水深の計測位置として図2.10の番号を用いる。また、図2.15～図2.17、図3.23～図3.37で示したケースごとの水深を、計測位置ごとに表し直したものを図4.1～図4.24に示す。

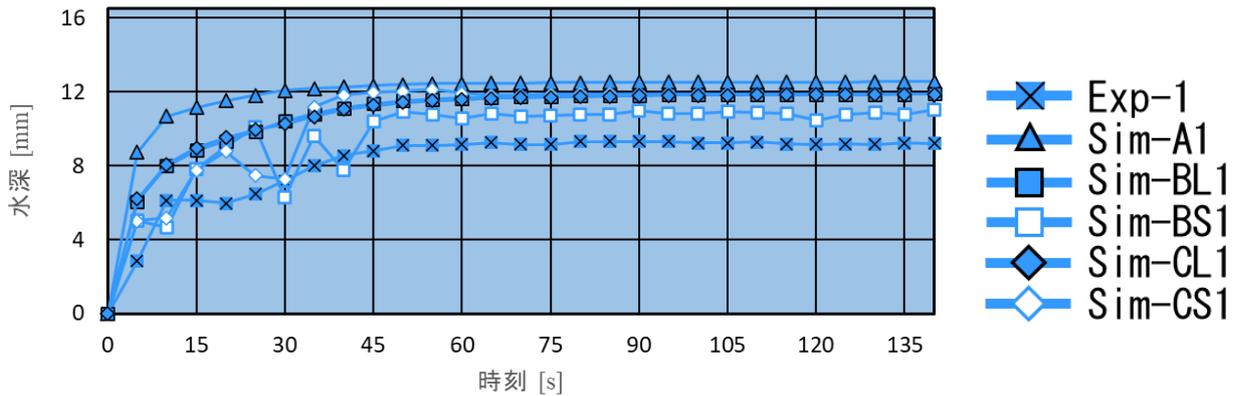


図 4.1 s1 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

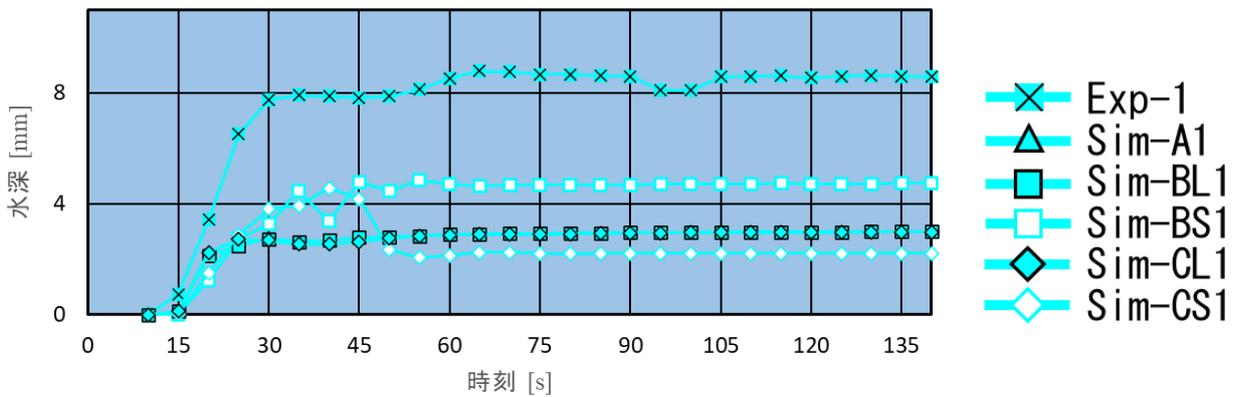


図 4.2 s2 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

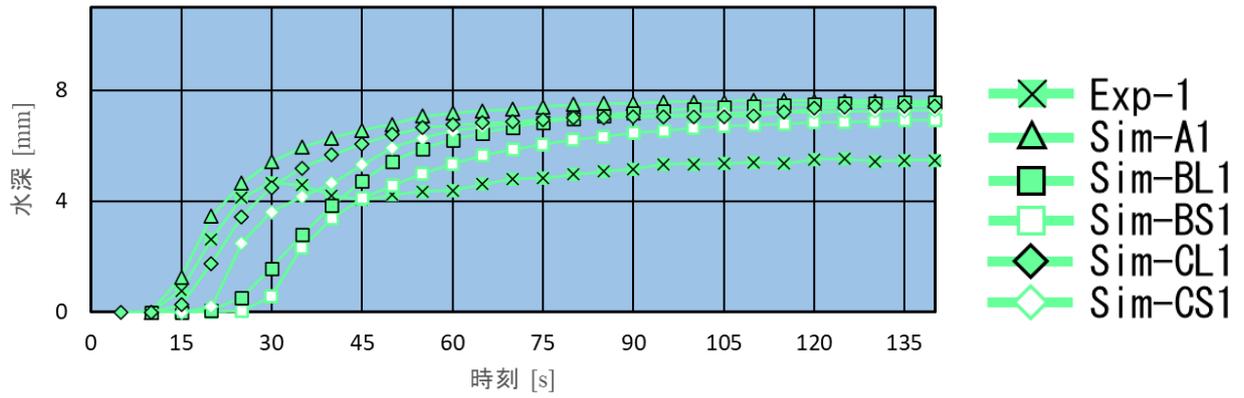


図 4.3 s3 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

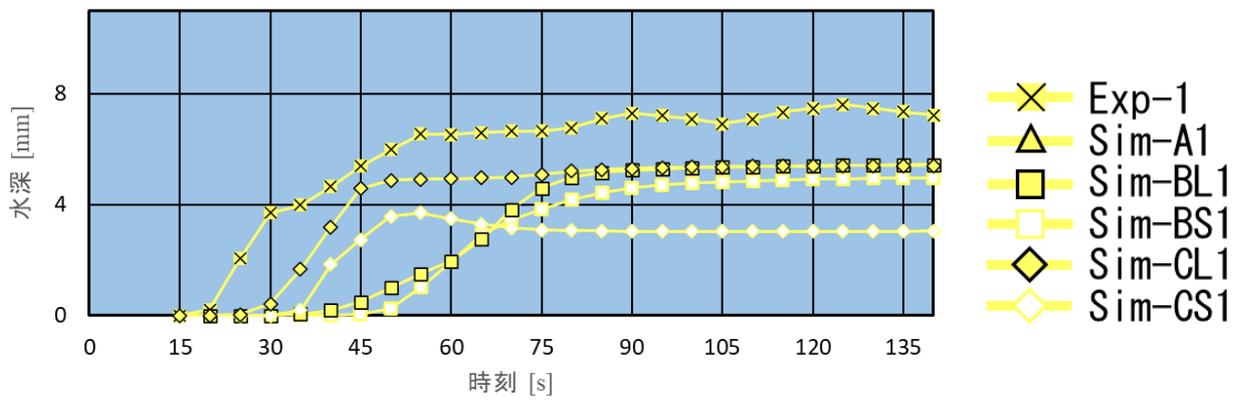


図 4.4 s4 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

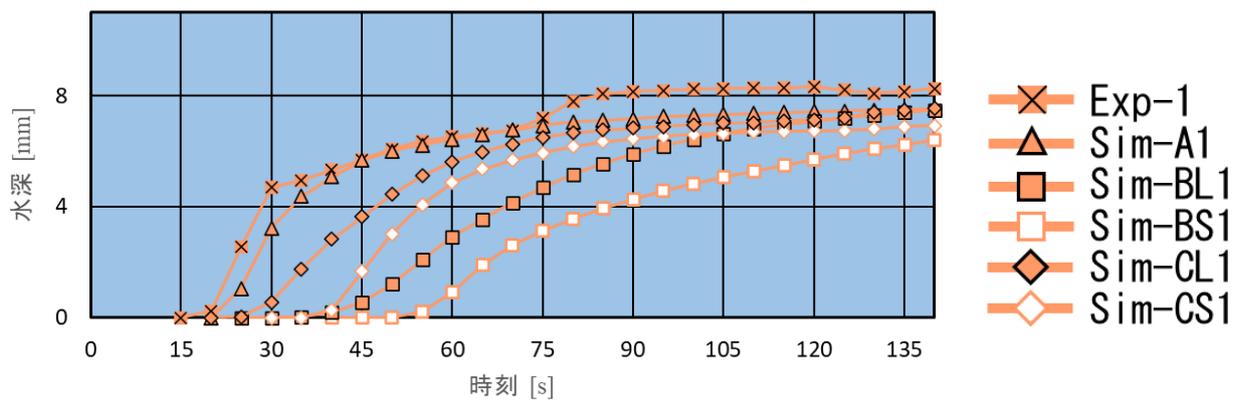


図 4.5 s5 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

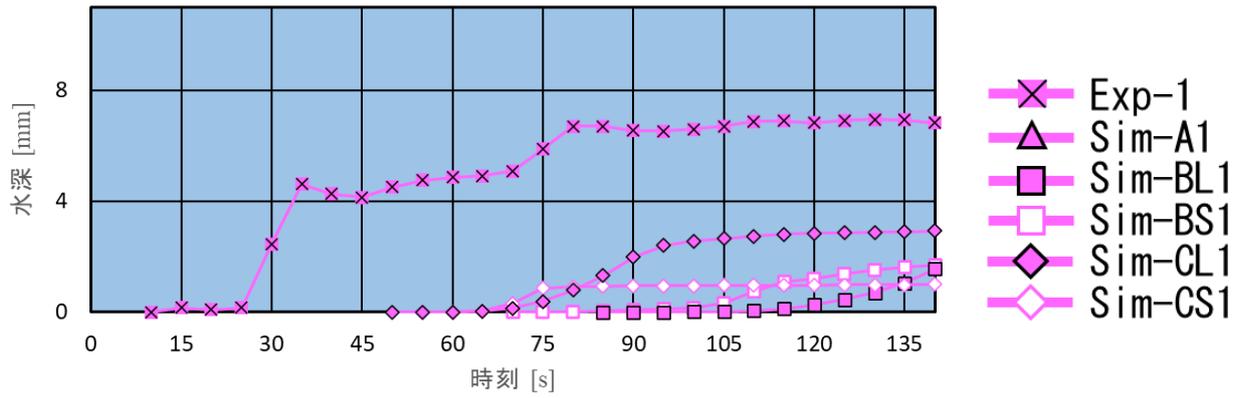


図 4.6 s6 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

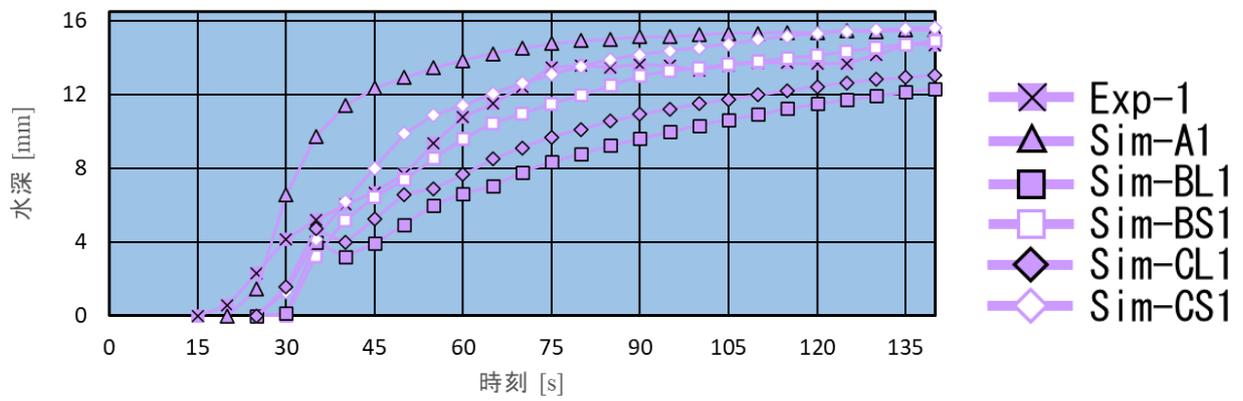


図 4.7 s7 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

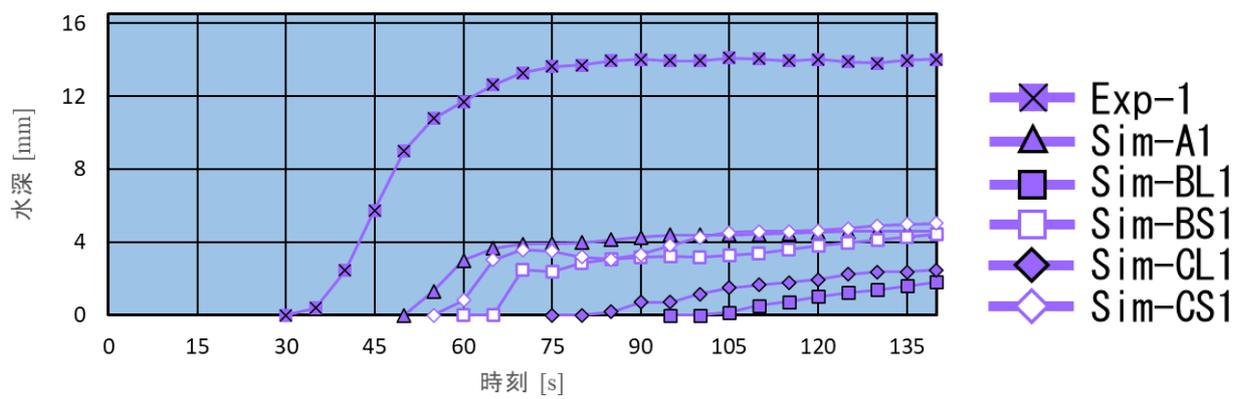


図 4.8 s8 での水深の変化 (流入流量 1.0L/s)

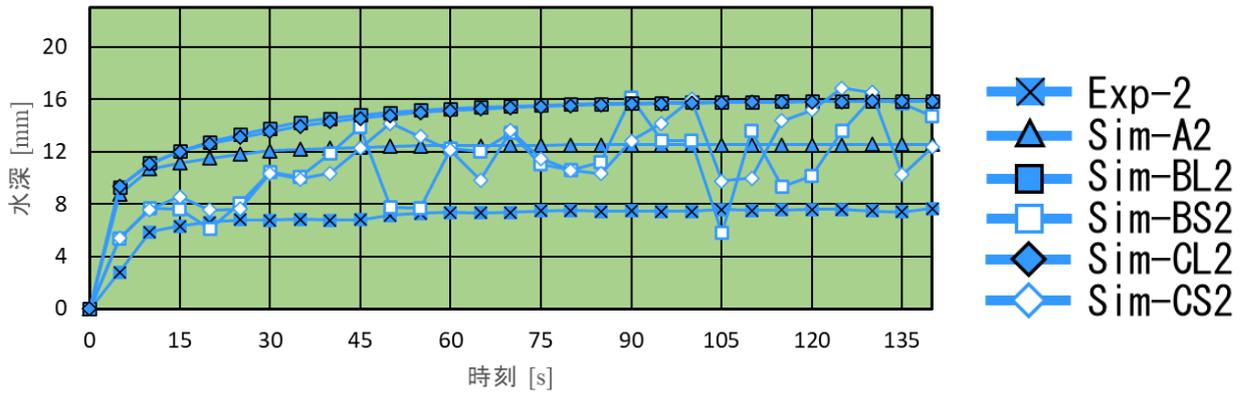


図 4.9 s1 での水深の変化（流入流量 2.0L/s）

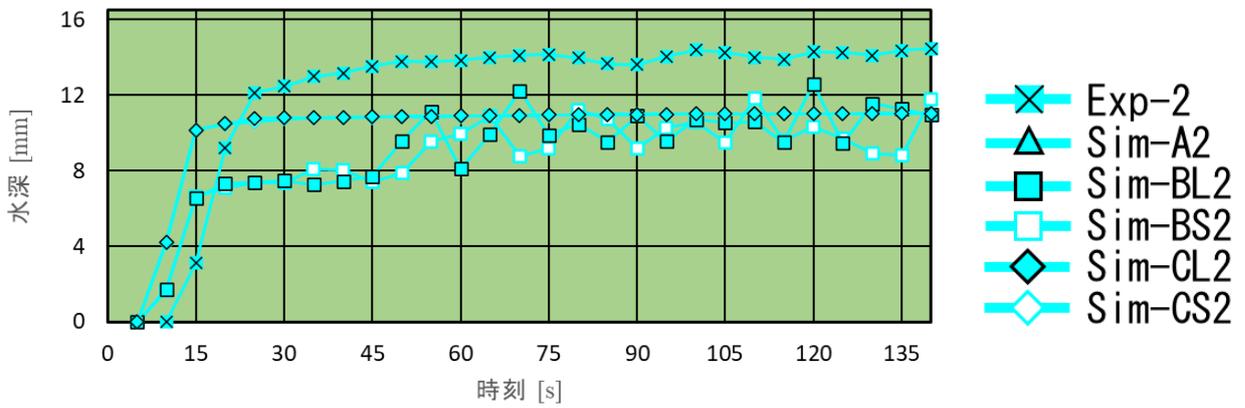


図 4.10 s2 での水深の変化（流入流量 2.0L/s）

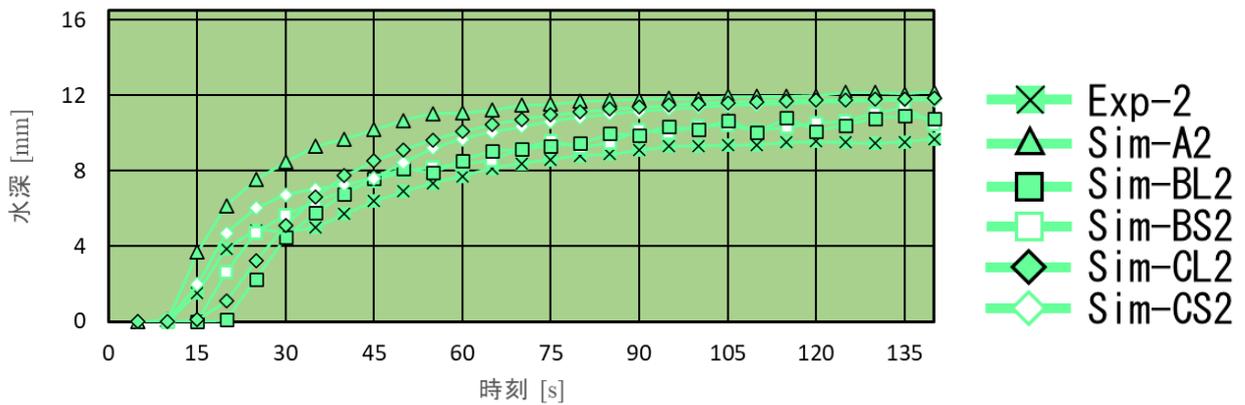


図 4.11 s3 での水深の変化（流入流量 2.0L/s）

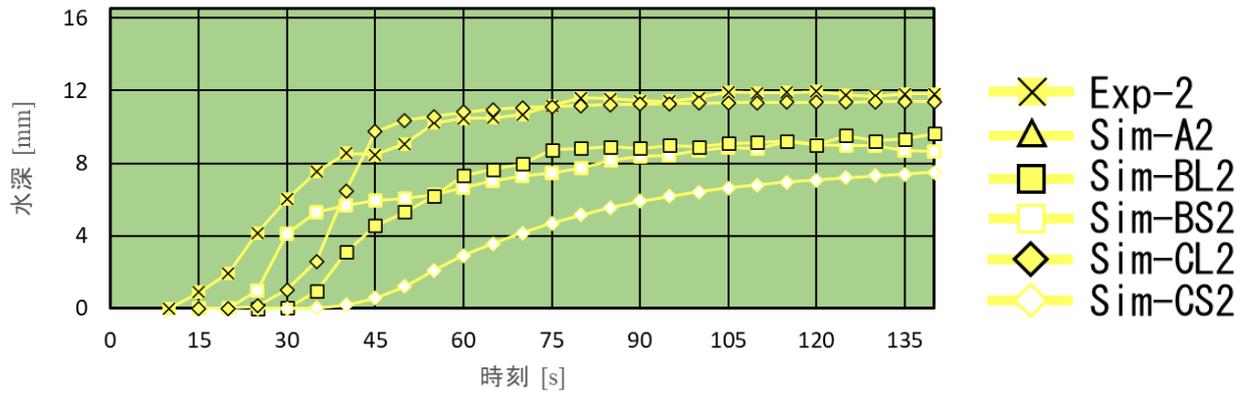


図 4.12 s4 での水深の変化 (流入流量 2.0L/s)

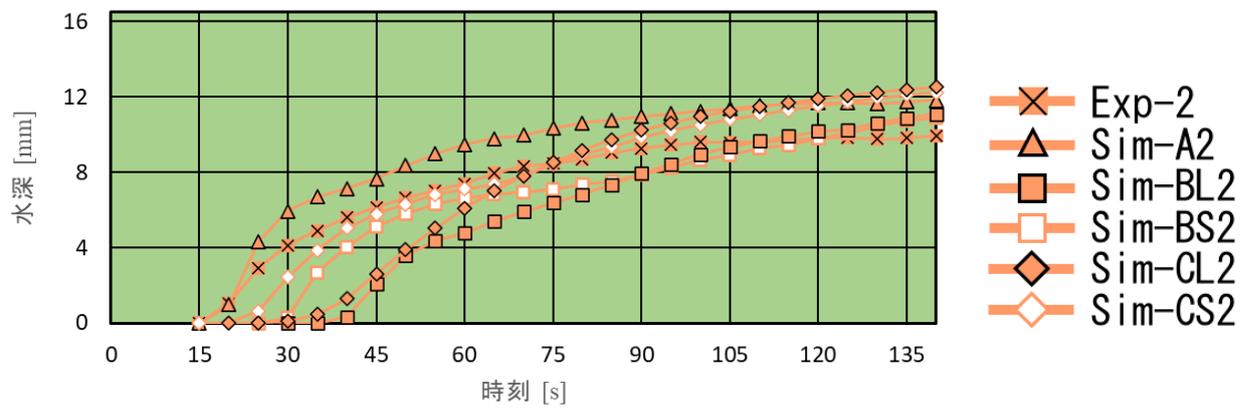


図 4.13 s5 での水深の変化 (流入流量 2.0L/s)

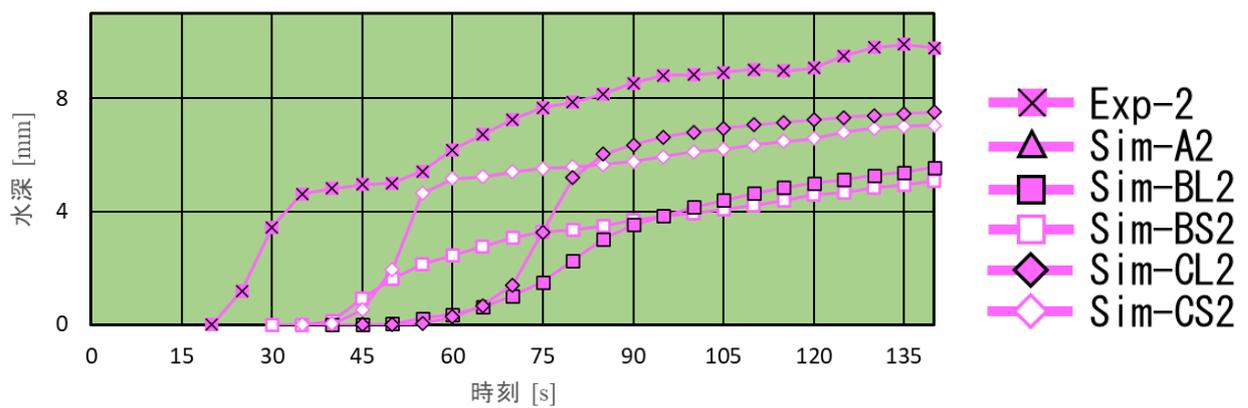


図 4.14 s6 での水深の変化 (流入流量 2.0L/s)

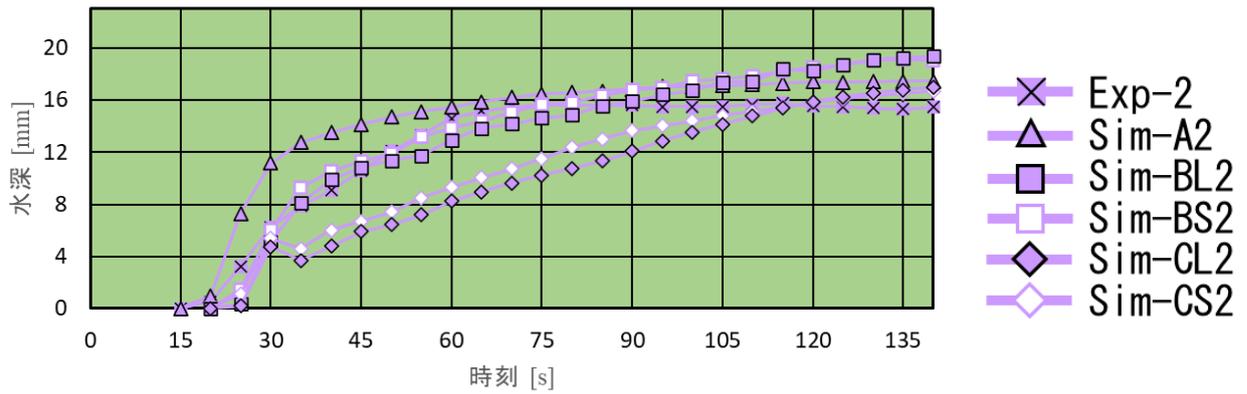


図 4.15 s7 での水深の変化 (流入流量 2.0L/s)

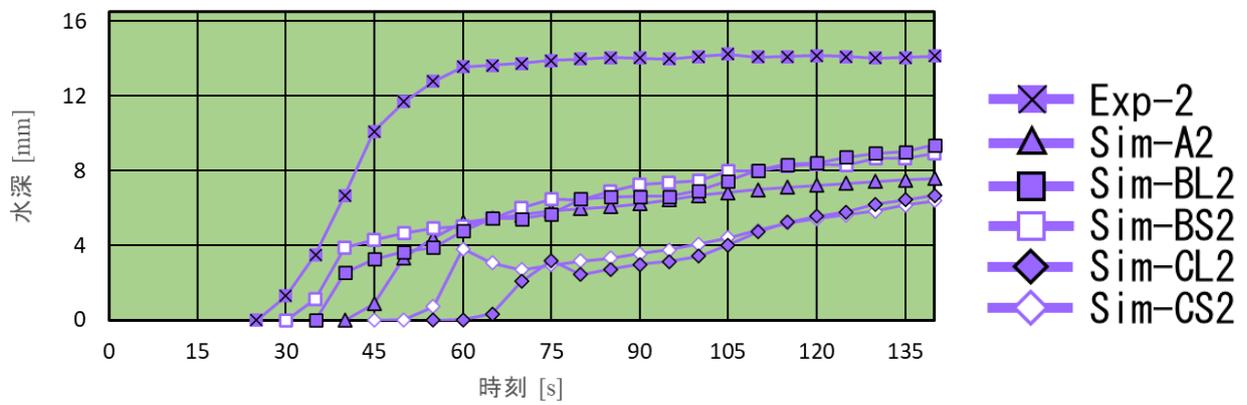


図 4.16 s8 での水深の変化 (流入流量 2.0L/s)

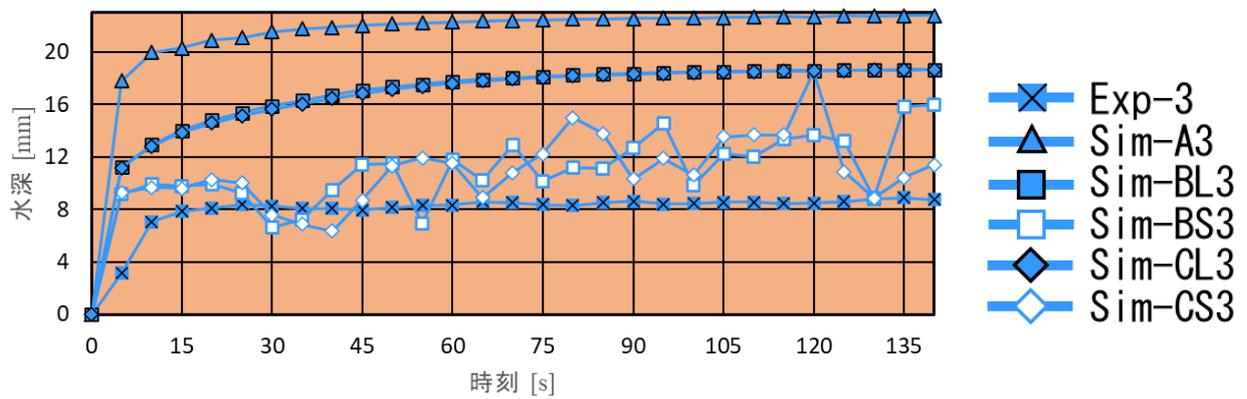


図 4.17 s1 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

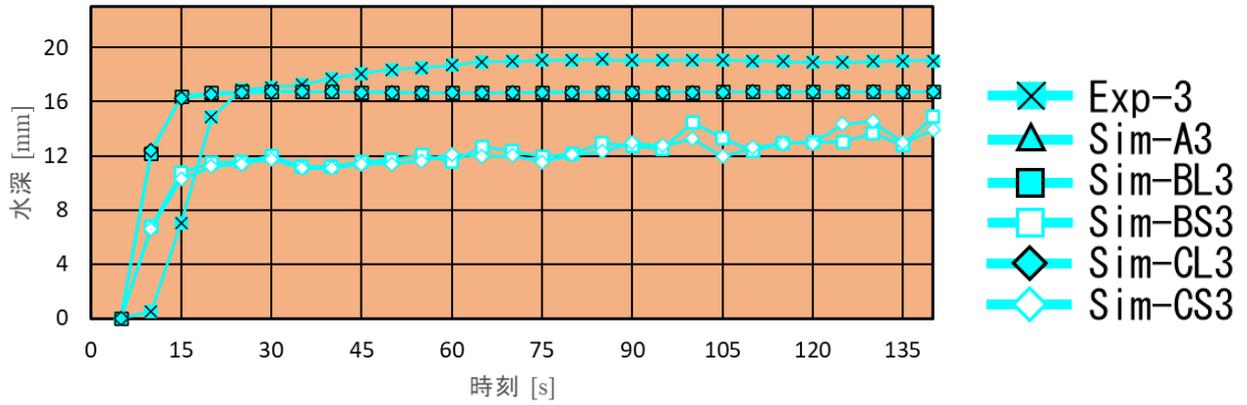


図 4.18 s2 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

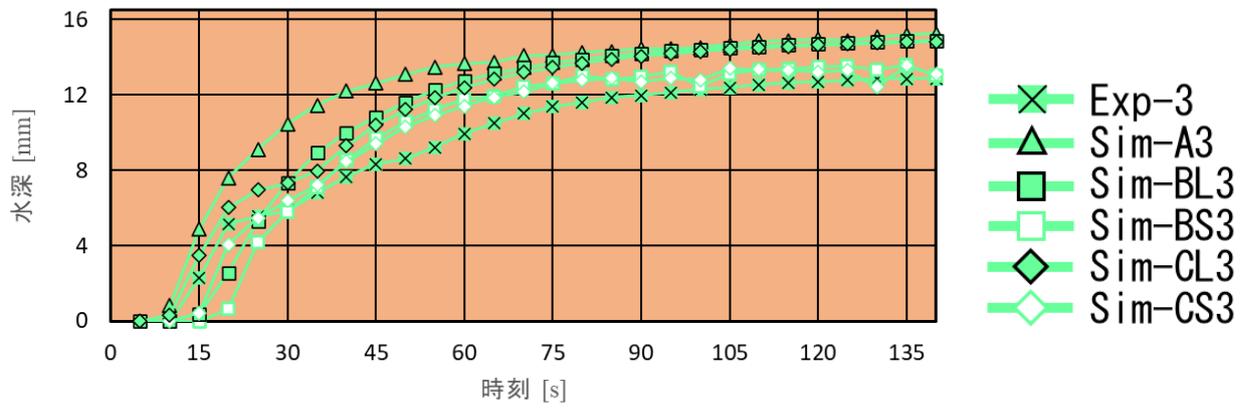


図 4.19 s3 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

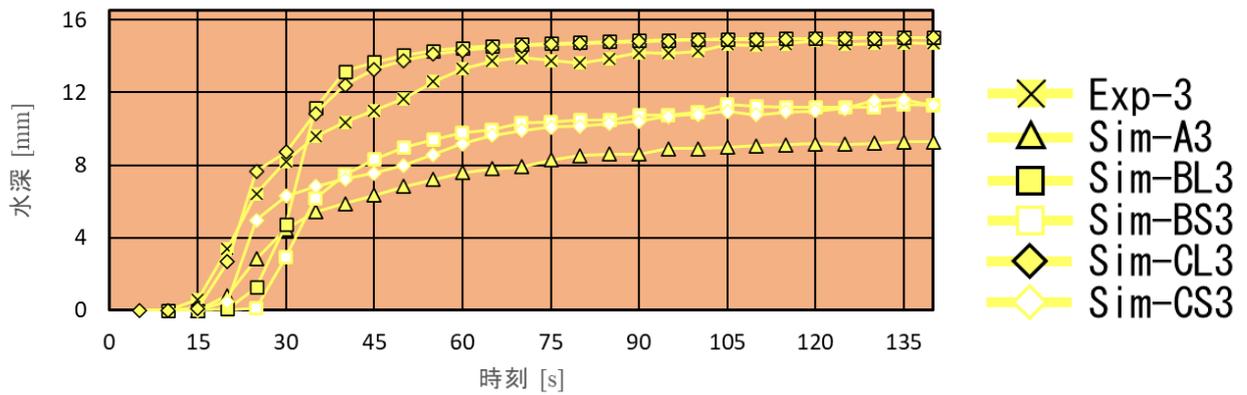


図 4.20 s4 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

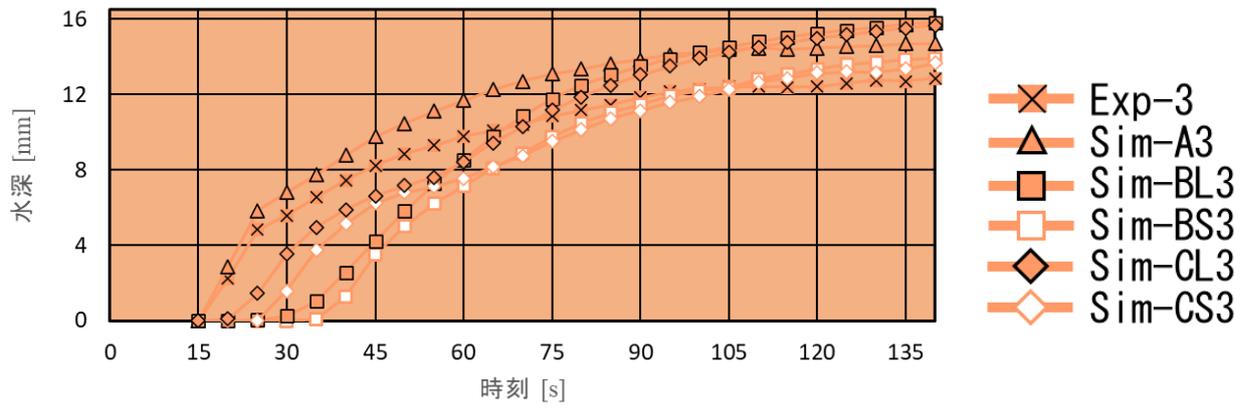


図 4.21 s5 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

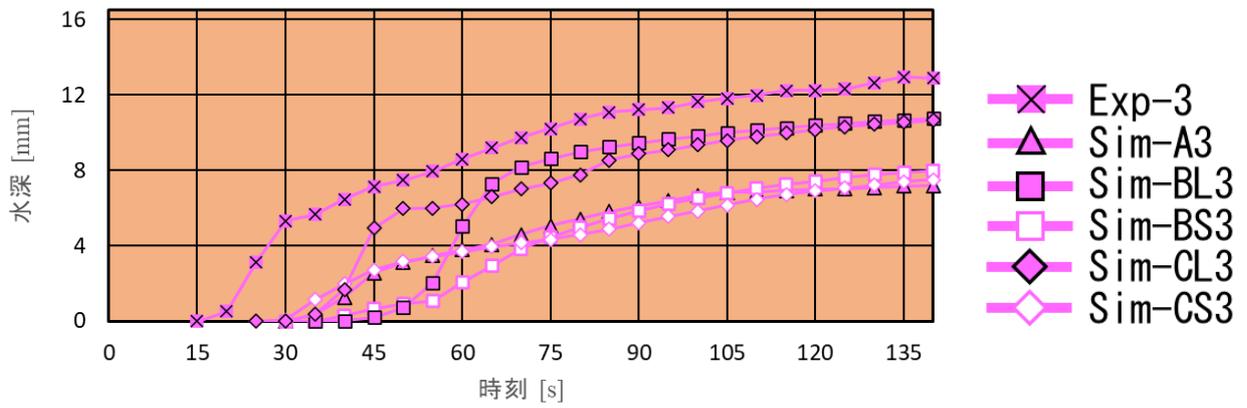


図 4.22 s6 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

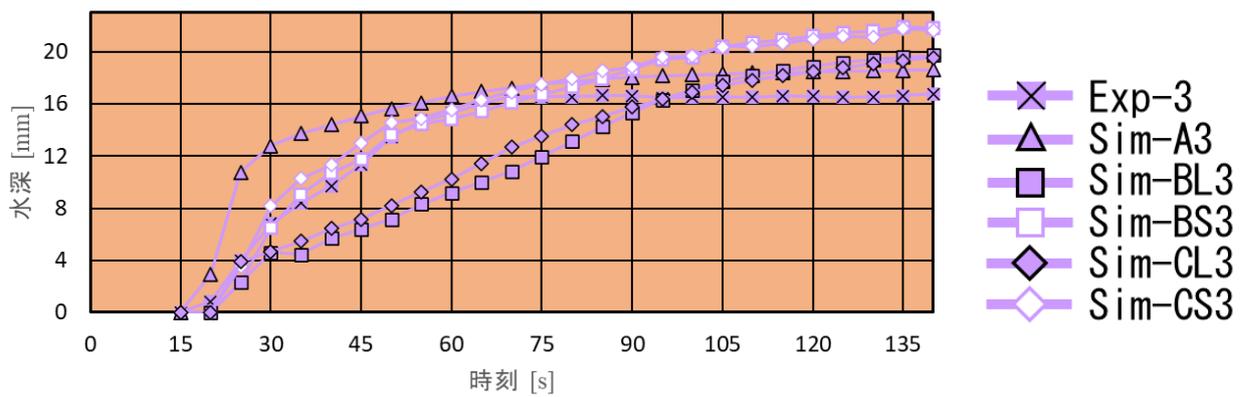


図 4.23 s7 での水深の変化 (流入流量 2.8L/s)

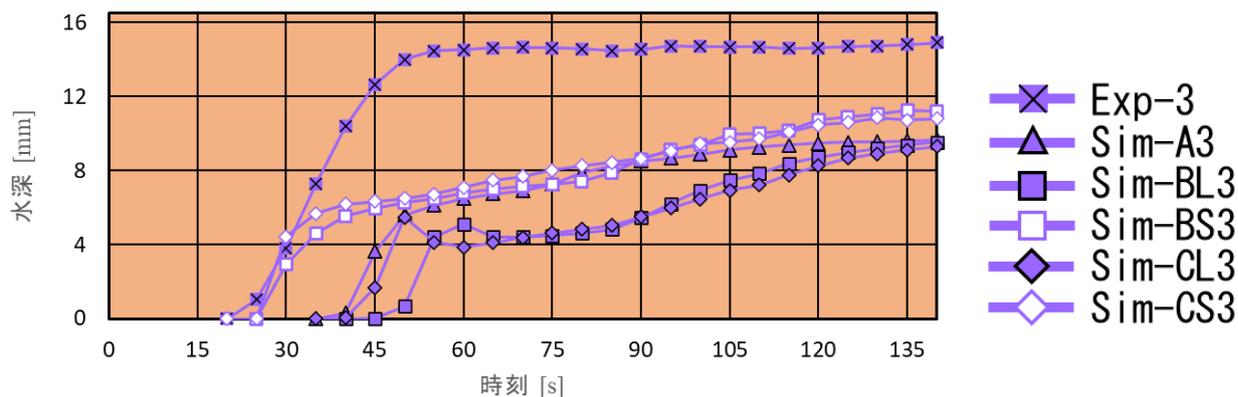


図 4.24 s8 での水深の変化（流入流量 2.8L/s）

4.1 実験と境界浸水モデルの比較

実験（Exp-1, Exp-2, Exp-3）の結果と境界浸水モデル（Sim-A2, Sim-A2, Sim-A3）の計算結果との比較を行う．図 2.12～図 2.14 と図 3.8～図 3.10 から流入開始 30 秒時点のものを選択して図 4.25 に示す．実験では 1mm 嵩上げした街区に氾濫水が乗り上がりずに道路を進む様子が観測されたが，計算では街区にも氾濫水が流れ込んだ．また，計算では勾配の影響を受けて左側（s2 より s1, s4 より s3, s6 より s5, s8 より s7）の水深が高い結果となったが，実験ではその傾向はなく，むしろすべてのケースで s3 より s4 の水深が高くなった．これらの現象は実験の氾濫水には表面張力の影響が大きく働いたことによるものと思われる．その影響で実験では主流から逸れる流れが小さくなる傾向にあり，流入部から横断方向に入った水は勾配に逆らって進む傾向が強くなり，道路から街区へ乗り上げたり建物の隙間に流れ込んだりする流れが小さかったと考えられる．

実験では，街区 1, 2, 3, 4 以外に存在する建物模型は周辺の水深があまり上がらず，浸水した建物模型は少なかった．流入流量 2.8L/s のケースでは街区 1, 2 の建物模型はほとんど浸水したが，流入流量 2.0L/s, 1.0L/s のケースでは街区 1, 2 の上流側の数個が浸水した．境界浸水モデルの計算結果では流入部に近い建物から順に周囲の水深が上昇し浸水を開始する結果となった．

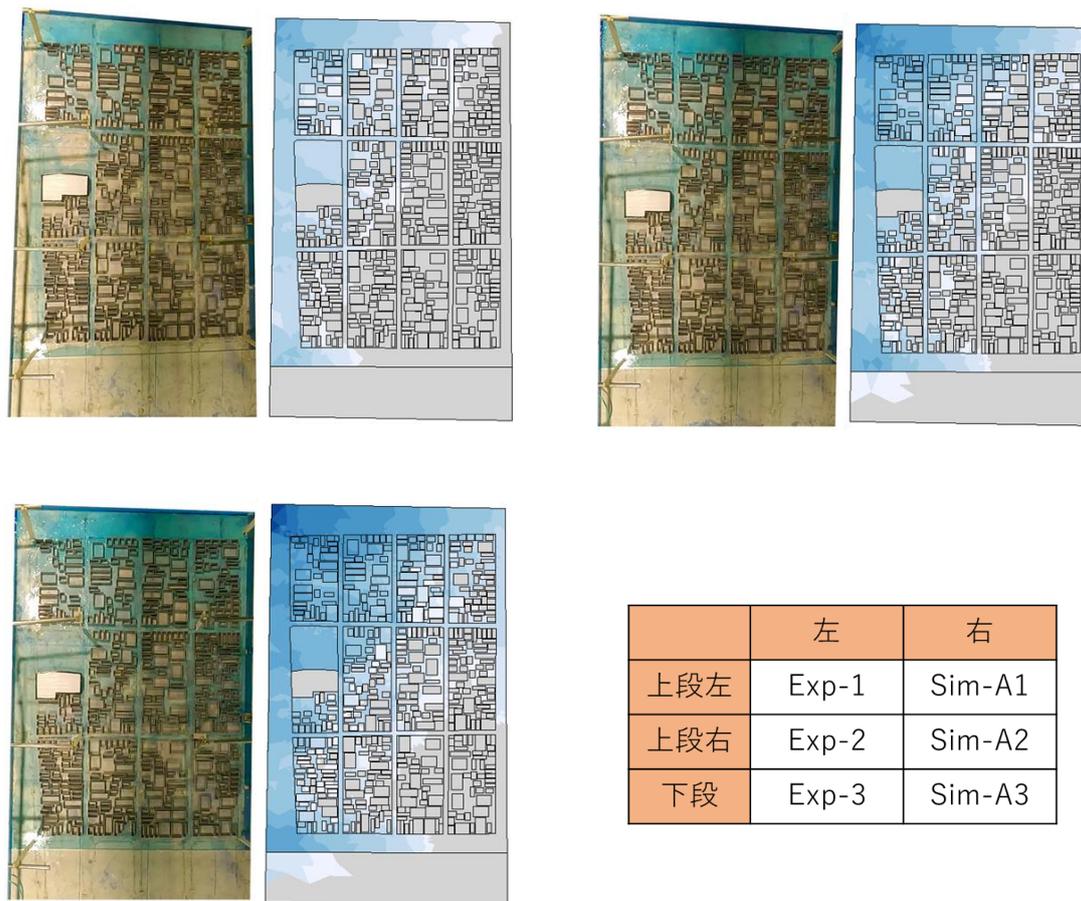


図 4.25 実験結果と境界浸水モデルの比較（流入開始 30 秒時点）

4.2 実験と国交省モデル・格子内浸水モデルの比較

実験と国交省モデル及び格子内浸水モデルを比較するにあたり，以下の項において国交省モデルと格子内浸水モデルとの比較，格子サイズの大小による結果の比較を行った後に，実験との比較を行う．

4.2.1 国交省モデルと格子内浸水モデルの比較

国交省モデルを用いた計算（Sim-BL1, Sim-BL2, Sim-BL3, Sim-BS1, Sim-BS2, Sim-BS3）と格子内浸水モデルを用いた計算（Sim-CL1, Sim-CL2, Sim-CL3, Sim-CS1, Sim-CS2, Sim-CS3）の結果を比較する．図 3.11～図 3.13, 図 3.17～図 3.19, すなわち 25cm 格子を用いたケースの計算結果から流入開始 50 秒時点のものだけを選択して図 4.26 に示す．

図 4.26 では，国交省モデルと格子内浸水モデルがともに市街地領域中央部の建物が密集しているところでは氾濫水の広がる速度が遅くなったことが分かる．その速度は格子内浸水モデルの方が速く，格子内浸水モデルの方が氾濫域は広がった．格子内浸水

モデルの方が速くなった理由として、建物の存在による格子面積の違いである。国交省モデルでは、格子内に建物があれば空隙率を適用するが、格子に氾濫水が流れ込んだ際に格子全域の水深が上昇する。それに対して格子内浸水モデルでは、格子の空隙率が大きいほど実質格子部の面積が小さくなり、氾濫水が流れ込んだ際にまずは実質格子部の水深のみが上昇する。そして実質格子部の水深が上昇した後に仮想建物部への浸水が始まる。その影響で、建物の多いところでは国交省モデルにおける格子の水深よりも、格子内浸水モデルにおける実質格子部の水深が速く上昇する。そのため、格子内浸水モデルでは氾濫水の伝播が速くなった。

図 4.1～図 4.24 の水深の時間変化からも、流入流量 1.0L/s の s1, s2 を除く図 4.3～図 4.8 では格子内浸水モデルが国交省モデルよりも水深が上昇を始める時刻が速かったことが分かる。しかし、流入流量 2.0L/s, 2.8L/s のケースでは s5, s6 を除いて格子内浸水モデルが速い傾向は見られなかった。流量が大きいケースでは s1, s2, s3, s4 の水深は急激に高くなるため、格子内浸水モデルの仮想建物への浸水が迅速に進み、国交省モデルとの差がほとんどない状態になったことが理由だと考えられる。

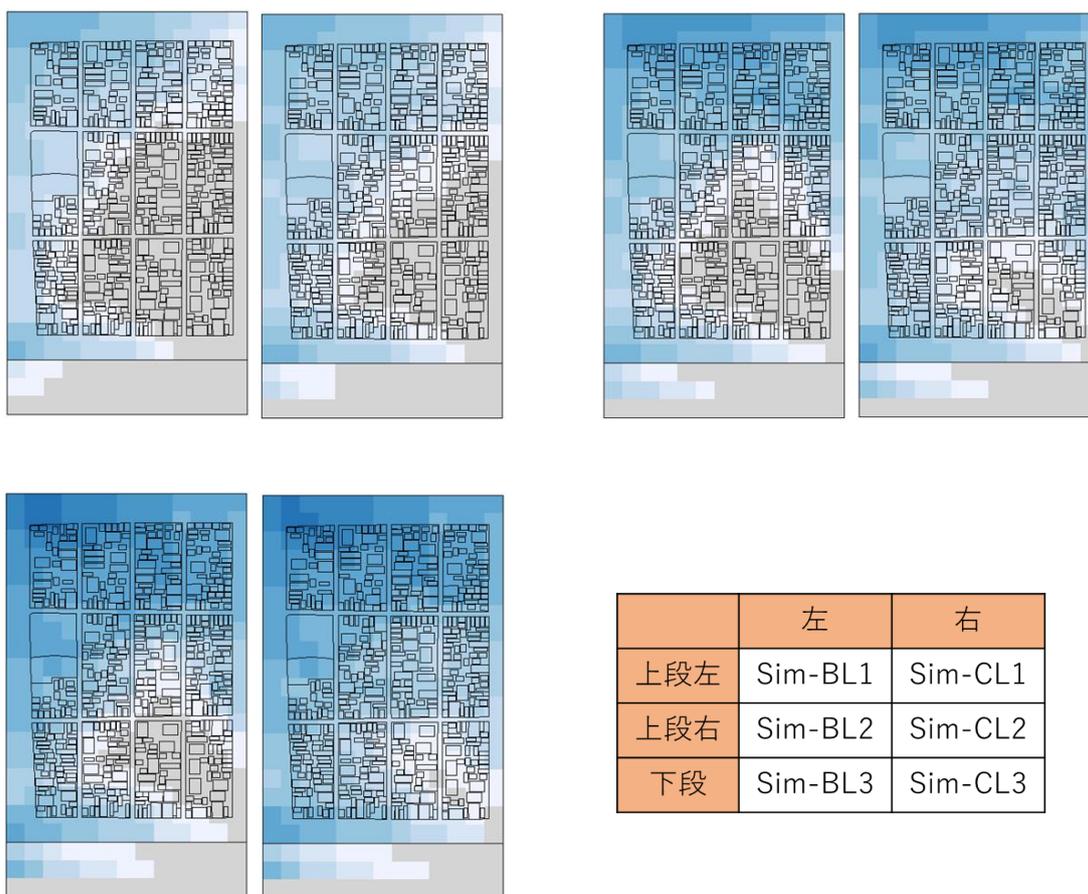


図 4.26 国交省モデルと格子内浸水モデルの比較（流入開始 50 秒時点）

4.2.2 格子サイズに関する考察

25cm 格子を用いた計算ケース (Sim-BL1, Sim-BL2, Sim-BL3, Sim-CL1, Sim-CL2, Sim-CL3) と 10cm 格子を用いた計算ケース (Sim-BS1, Sim-BS2, Sim-BS3, Sim-CS1, Sim-CS2, Sim-CS3) を比較する。一例として, 図 3.13, 図 3.16, 図 3.19, 図 3.22 から流入開始 30 秒時点のものを図 4.27 に示す。

図 4.27 から, 国交省モデルと格子内浸水モデルはともに, 格子サイズが小さい方が右端の道に沿って流下する流れが大きくなったことが分かる。これは, 右端の格子の空隙率によるものと思われる。右端の格子について, 10cm 格子では建物がまったく重ならないため空隙率は 1 であるが, 25cm 格子では街区 4, 8, 12 と重なるため空隙率が 1 ではない。そのため, 空隙率の高い格子を優先して流れる様子が顕著に表れたのだと考えられる。

図 4.8, 図 4.16, 図 4.24 では s8 での水深が 10cm 格子の方が先に上昇していることが確認でき, 10cm 格子のケースでは氾濫流が右端の道に沿って速く流下したことが裏付けられる。

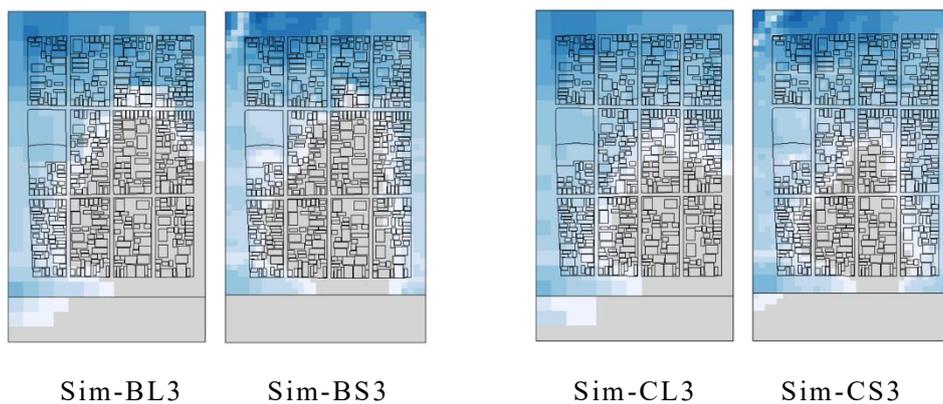


図 4.27 格子サイズの異なるケースの比較 (流入開始 30 秒時点)

4.2.3 実験との比較

実験 (Exp-1, Exp-2, Exp-3) の結果と国交省モデル及び格子内浸水モデル (Sim-BL1, Sim-BL2, Sim-BL3, Sim-BS1, Sim-BS2, Sim-BS3, Sim-CL1, Sim-CL2, Sim-CL3, Sim-CS1, Sim-CS2, Sim-CS3) の計算結果との比較を行う。図 2.12~図 2.14 と図 3.11~図 3.22 から流入開始 30 秒時点のものを選択して図 4.28 に示す。

実験では道に沿う流れが大きかったため街区や建物が浸水する前に下流まで氾濫流が及んだが, 計算結果はいずれも流入部に近い格子から深く浸水したのが確認できる。国交省モデルと格子内浸水モデルを比較したときに, 道に沿って流下する流れが大きく

建物が密集している領域を抵抗として避ける傾向は、格子内浸水モデルの方が表現できていると言える。

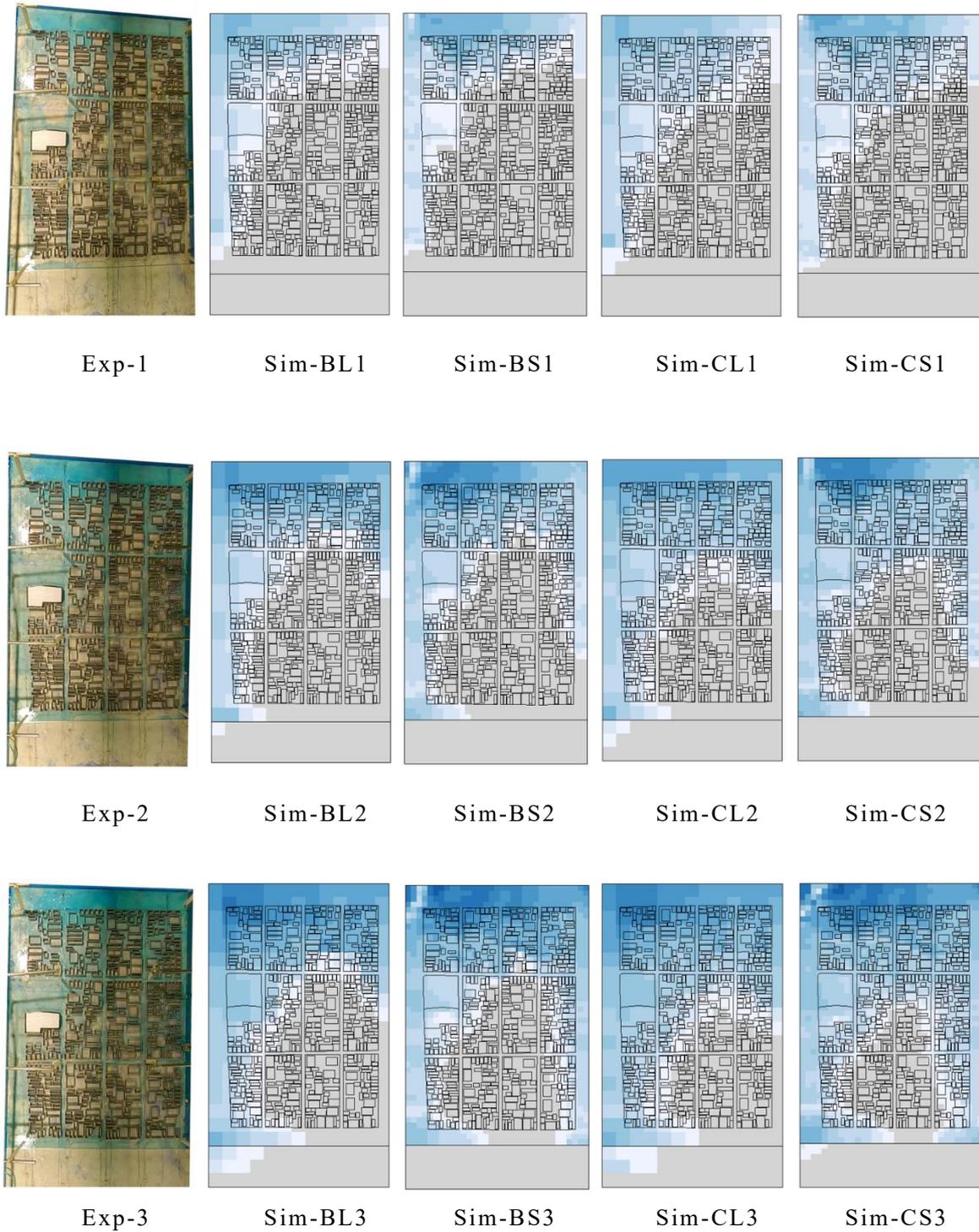


図 4.28 実験・国交省モデル・格子内浸水モデルの比較（流入開始 30 秒時点）

4.3 氾濫解析手法のまとめ

前節で行った 3 つの氾濫解析手法による計算結果と実験結果との比較を踏まえて、各手法の特徴を記す。

境界浸水モデルは、建物壁面の境界から氾濫水が時間をかけて浸水する現象を、非構造格子を用いた従来の解析手法に取り入れたモデルであった。実験との比較の結果、実験場で氾濫水が受ける勾配や表面張力の影響を反映することはできなかった。この点については、氾濫解析が実験を再現できなかったという観点の他に、縮尺や実験規模によっては実縮尺の現象と異なる現象が見られる可能性があるという捉え方も可能である。また、境界浸水モデルは格子数が 19969 個であり、他の 2 手法で扱った格子は 10cm 格子でせいぜい 1815 個であったため、その 10 倍以上と非常に多くなった。格子を細かくすることで建物の配置や形状を詳細に再現可能ではあるが、メッシュ生成の手間と計算時間を考えると、今後氾濫解析の標準手法として広く用いられるほどの実用性は根本的に備えていないと言える。

国交省モデル・格子内浸水モデルは、メッシュ生成の観点では実用性の高いモデルである。双方とも境界浸水モデルよりは格子分割は粗いが、建物を抵抗と捉えた氾濫流の挙動が確認された。格子のサイズを 25cm 格子と 10cm 格子の 2 通り用いたが、格子が細かいほど、ちょうど道に重なって建物が一切含まれない格子を流下する流れが大きくなる傾向が見られた。道に沿う流れが大きい傾向は実験でも確認され、格子を細かくすれば実現象の再現性が高くなる可能性が示唆された。

格子内浸水モデルと国交省モデルの比較において、格子内浸水モデルの方が氾濫流が流下するが速かった。これは、計算中に格子面積として扱う部分の面積が、国交省モデルでは格子全体の面積であるのに対し、格子内浸水モデルでは格子面積に空隙率を乗じた実質格子部の面積であるためである。このモデルは、建物の存在を考慮しつつ、建物を避けながら広がる氾濫流の様子、また水深が高くなると建物へ浸水が発生する様子が表現できるため、他の 2 手法と比較して実用性の高いモデルであると考えられる。

本研究の境界浸水モデルは詳細であるがゆえに計算に要する労力が大きくなってしまったが、建物の形状までは再現せずに道路と街区の形状だけを非構造格子で再現し、街区格子では格子内浸水モデルと同様の手法を用いて格子内で浸水量を計算するモデルも考えられる。本研究の結果を踏まえ、モデルごとの利点を合わせてより良いモデルを構築することが必要であると考えられる。

第5章 結論

本研究では、氾濫において建物への浸水は時間をかけて生じるものという前提の下、実際の市街地を模した建物配置を擁する市街地モデルを対象とした氾濫実験と氾濫解析を行った。また、実験結果と解析計算結果を比較することで、解析モデルの妥当性を評価した。

氾濫実験では縮尺 1/100 で建物モデルを作成し、氾濫台上に対象領域の建物配置になるよう並べた。これらの建物モデルには小さな穴を開けることによって内部に氾濫水が浸入するようにした。1箇所流入部から常に一定の流量を与え、氾濫台鉛直上方のビデオカメラで氾濫の様子を撮影した。また、8カ所に超音波変位計を取り付けて水深を計測した。その結果、街区と街区の間の道を流下する流れが大きくなった。また、建物モデルの浸水については、流量が小さいケースでは上流のみで浸水が発生し、流量が大きいケースでは上流から下流にかけて浸水が生じた。

氾濫解析では、境界浸水モデル・国交省モデル・格子内浸水モデルの3手法を用いて、実験の市街地領域を対象とした氾濫解析を行った。その結果、いずれのケースも大きな道に沿う流れは表現できていたが、実験の完全な再現には至らなかった。それは実験規模が小さい場合は氾濫水が受ける勾配の影響が小さく表面張力の影響が大きかったためだと考えた。すなわち、ある程度の縮尺より小さい実験では実現象を表現することに限界があることが示唆された。

解析モデルどうしの比較の結果、従来の国交省モデルよりも格子内浸水モデルの方が、氾濫流が道路に沿って流れる傾向をより強く捉えていることが分かった。今後はより広い領域に適用したり実際の観測結果と比較したりする等、さらなる妥当性の検証が必要であると考えられる。また、この2手法は格子面積の異なる2通りのメッシュを用いて計算を実施し、格子が細かい方が建物配置を詳細に表現できるため、道に沿う流れをより強く表した。しかし、今後実用性を求めるのであれば、格子数の多い手法は時間コストを要するため不適切と言える。境界浸水モデルは格子数が他手法の10倍以上とあまりにも多いため、広く用いられる手法には適していない。

今後の課題として、境界浸水モデルと格子内浸水モデルで用いた浸入口の大きさや高さといったパラメータの検討が挙げられる。本研究では既往研究に倣って同様の数値を用いたが、未だ検証が十分とは言えない。パラメータ設定のひとつの方法として、国交省マニュアルは家屋倒壊の条件を定めるにあたり提示しているモデル家屋を基準にする方法が考えられる。ただし、実都市において建物の大きさや形状は様々であり、建物の特性によって数種類の属性に分ける等の工夫があれば精度は向上すると考えられる。また、実験領域だけでなく実縮尺の実際の市街地での適用、その場合の妥当性評価も課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：河川審議会答申 21 世紀の社会を展望した今後の河川整備の基本的方向について，1996
(https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/shingi/to-index.html)
- 2) 環境省：IPCC 第 5 次評価報告書の概要－第 1 作業部会（自然科学的根拠）－、2019.
(http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wgl1_overview_presentation.pdf)
- 3) 国土交通省：気候変動の影響について，2019
(https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiinkai/kikouhendou_sugai/1/pdf/09_kikouhendounoeikyou.pdf)
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室，国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）
- 5) 川池健司：都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究，京都大学学位論文，2002.
- 6) 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，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.67，No.4，I_979-I_984，2011.
- 7) 福岡捷二，川島幹雄，松永宜夫，前内永敏：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集，No.491／II-27，pp.51-60，1994.
- 8) 赤穂良輔，前野詩朗，小川俊，吉田圭介：都市氾濫解析に用いる建物群の空隙率の設定方法に関する実験的検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.4，pp.I_1525-I_1530，2018.
- 9) 小内堯，田中規夫，伏見健吾，猪飼哲：空隙率の異方性が氾濫形態に及ぼす影響に関する実験的研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.5，pp.I_1537-I_1542，2018
- 10) 阿部将也，武田誠，中島勇介，村瀬将隆，松尾直規：建物への流入・流出を考慮したデカルト座標系の氾濫解析モデルの検証，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.75，No.2，I_1255-I_1260，2019
- 11) 桑村仁，小山毅，奥野寛樹，佐藤恵治：家屋の浸水試験方法とその実施例，日本建築学会構造系論文集，第 80 巻，第 717 号，1763-1771，2015.
- 12) 藤森健人，川池健司，山野井一輝，中川一：建物内部への浸水を考慮した氾濫実験と基礎的な数値解析モデル検証への適用，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.76，No.2，I_673-I_678，2020.
- 13) 中川一，石垣泰輔，武藤裕則，井上和也，戸田圭一，多河英雄，吉田義則，辰巳賢一，張浩，八木博嗣：都市における洪水氾濫－大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析－，京都大学防災研究所年報，第 46 号 B，2003.

- 14) 井上和也：開水路非定常流とその水工学への応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.172-177，1986.

謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり懇切丁寧なご助言を賜りました京都大学防災研究所 流域災害研究センター 河川防災システム研究領域 川池健司教授，山野井一輝助教に深く御礼申し上げます。そして、元京都大学防災研究所 流域災害研究センター 河川防災システム研究領域 教授の中川一様には研究の初歩からご指導・ご鞭撻賜りました。ここに深く御礼申し上げます。また、京都大学防災研究所 流域災害研究センター 都市耐水研究領域の米山望准教授，京都大学防災研究所 社会防災研究部門 防災技術政策研究分野 佐山敬洋准教授にもご指導賜りました。ここに感謝申し上げます。

本研究で用いた実験模型の作成にご尽力いただいた株式会社上田メカニック研究所 代表取締役 上田幸伸様，実験環境を整備していただいた宇治川オープンラボラトリー 技術職員 三浦勉様，中本幹大様，快適な研究室生活を支えていただいた秘書の山本一美様，そして本研究への助力に留まらず食事や娯楽の面でも研究生活を豊かにしていただいた宇治川オープンラボラトリーの学生の皆様に深く感謝の意を表します。