2025 年度　卒業論文

福岡県柳川市における

内水氾濫シミュレーションモデルの開発

2025 年 1 月 24 日

田中理彩

（学籍番号：21B50695）

指導教官　中村　恭志　准教授

東京科学大学　環境・社会理工学院　土木・環境工学系

目次

第 1 章.　序論.....2
1.1.　背景.....2
1.2.　既往研究.....2
1.3.　研究の目的.....3
1.4.　論文の構成.....3
第 2 章.　基礎方程式と GPGPU による計算高速化処理.....6
2.1.　基礎方程式.....6
2.2.　GPGPU による計算高速化処理.....8
第 3 章.　福岡県柳川市の内水氾濫のモデル化.....11
3.1.　研究対象区域の概要.....11
3.2.　ハザードマップの作成手順.....11
3.3.　計算用データの作成.....12
3.4.　計算条件の設定.....14
第 4 章.　令和 2 年 7 月豪雨の再現計算.....18
4.1.　対象区域・対象期間.....**エラー! ブックマークが定義されていません。**
4.2.　計算結果.....18
第 5 章.　結論.....46
5.1.　研究の統括.....46
5.2.　今後の課題.....46
謝辞.....46
参考文献.....47

第1章. 序論

1.1. 背景

近年、地球温暖化の影響を受けて日本各地で豪雨災害が頻繁に発生している。気象庁によると、1 時間当たりの降水量が 50 ㎜以上となるような大雨の年間発生回数は年々増加している。最近 10 年間(2014～2023 年)の大雨の発生回数は約 330 回であり、過去 10 年間(1976～1985 年)の約 226 回の記録と比較すると、その変化倍率は約 1.5 倍となっている。 [1]令和 4 年度の水害統計調査によると、2013～2022 年の 10 年間の全国の水害被害額の合計は約 4.1 兆円で、そのうちの約 3 割にあたる約 1.4 兆円が内水氾濫による被害額であり、内水氾濫による浸水棟数は全体の約 6 割の約 17 万棟に上る。 [2]内水による浸水は被害額が大きく、社会経済的な影響も大きい。

気候変動に伴う降雨量の増加に対して、大雨や短時間豪雨の発生頻度や大雨の降水量が増大することが予測されており、内水による浸水の発生頻度が高くなる懸念が高まっている。そのため、内水氾濫による浸水範囲の把握は喫緊の課題である。内水による浸水のリスクや避難に関わる情報などを効果的に住民に提供することが求められる。平成 27 年の水防法の改正により内水氾濫へのソフト対策として、想定し得る最大規模の内水に関わる浸水想定区域を指定することが必要とされた。避難体制の充実・強化を図るためには「内水ハザードマップ」の作成は必要である。

福岡県では過去 7 年間で平成 29 年の九州北部豪雨以降、平成 30 年の 7 月豪雨、令和 1 年の 8 月豪雨、令和 2 年の 7 月豪雨、令和 3 年の 8 月豪雨、令和 5 年の 7 月豪雨と計 6 回の自然災害に見舞われている。平成 30 年～令和 3 年に全国で唯一、5 年連続で大雨特別警報が発令され、内水氾濫が発生している。

本研究では福岡県柳川市を研究対象としている。柳川市は福岡県南部に位置し、筑後川と矢部川に挟まれた場所である。市域の中央部には矢部川の支流である沖端川、塩塚川などの一級河川（県管理）が流れており、沖端川、塩塚川はそれぞれ有明海に流れ込んでいる。

有明海の干満差は大きく大潮時には 6m に達する。そのため、有明海の満潮時間と大雨が重なると排水することができず、住宅地の浸水、道路・農地などの冠水の被害は大きくなる。柳川市では、緊急排除水門の増改築や緊急排水ポンプの増設、上流域の洪水調節ダムの建設等の浸水対策が図られており、被害は減少している。しかし、柳川市では平成 29 年の 7 月豪雨に床下浸水が 6 軒、令和 2 年には床下浸水 116 世帯を記録しており、依然として浸水被害は発生している。 [3]

1.2. 既往研究

内水浸水想定区域図の作成には浸水シミュレーションによる浸水想定を原則としている。[4]一般的には、浸水シミュレーションは降雨損失モデル、表面流出モデル、管内水理モデル、氾濫解析モデルの各モデルの解析データの受け渡しを得て行う。また、管きょモデルを

省略した簡易的な手法で内水浸水想定区域図を作成することも可能である。浸水シミュレーションの概要は図 1.2.1 [5]のようになる。

一般的に津波や洪水氾濫の数値シミュレーションには浅水方程式が用いられている。平面二次元浅水方程式に基づく氾濫モデルでもターゲットの違いによってさまざまなモデルが存在する。例えば、障害物の多い都市域を対象としたモデル [6] [7]や急勾配地形などの複雑な地形に焦点を当てたモデル [8]が存在する。

水災害の頻発化が増大しつつある中で、これまで河道改修やダム等を中心としたハードな治水対策だけでなく、河川流域、氾濫域であらゆる関係者が協働して減災・防災に取り組み、流域の治水安全度を高めていくことを目指す「流域治水プロジェクト」が各地で行われている。 [9]矢部川水系では、内水氾濫の対策として大雨が予想される前に水路の水を排水して水位を下げる、先行排水が行われている。 [10]

1.3. 研究の目的

当研究は内水氾濫の抑制に対しての掘割の有効性を検討することが目的である。本論文では掘割の有効性を検討するにあたって必要な、空間解像度が高い内水氾濫シミュレーションが実現可能かを検討する。

1.4. 論文の構成

本論文は、本章を含む 5 章で構成される。

まず、本章で GPGPU を用いて内水氾濫のシミュレーションを行うに至った背景や研究目的を示す。また本研究を行う前に調査した既往研究を述べる。第 2 章では基礎方程式として用いる浅水方程式およびその離散化手法と GPGPU による計算の高速化について述べる。第 3 章では本研究での内水氾濫のモデル化の手順や研究対象区域である柳川市の過去の氾濫被害について述べる。第 4 章では内水氾濫の解析の結果をまとめる。第 5 章では本研究の統括と今後の課題をまとめる。

図表集

第 1 章

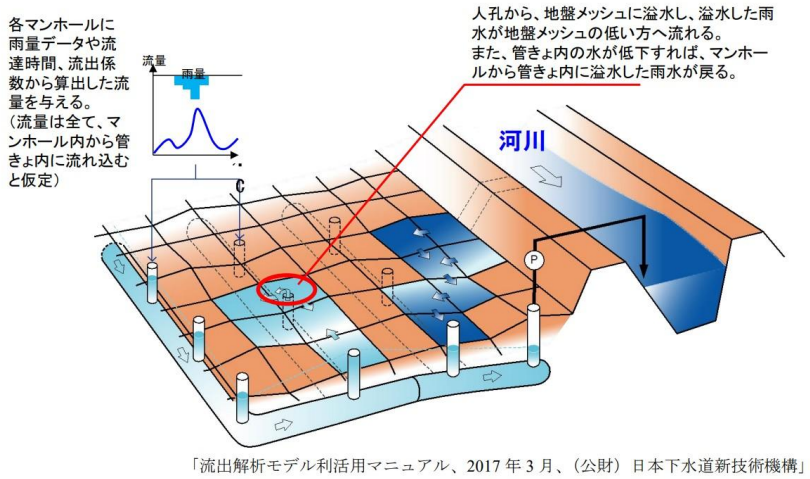

図 1.2.1　浸水シミュレーションの概要（文献[5]から転載）

第2章. 基礎方程式と GPGPU による計算高速化処理

2.1. 基礎方程式

2.1.1. 浅水流方程式

本モデルでは 2 次元不定流解析モデルを用い、静水圧分布の仮定のもと、3 次元空間に対する Navier-Stokes 方程式を鉛直方向に積分することで与えられる浅水流方程式を基礎方程式としている。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{dhu}{dx}+\frac{\partial hv}{\partial y}=S_h \tag{2.1.1}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t}+\frac{\partial hu^2}{\partial x}+\frac{\partial huv}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}+F_{u,\mathrm{col}}+F_{u,\mathrm{fric}}+F_{u,\mathrm{Rey}}+S_u \tag{2.1.2}$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t}+\frac{\partial huv}{\partial x}+\frac{\partial hv^2}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}+F_{v,\mathrm{col}}+F_{v,\mathrm{fric}}+F_{v,\mathrm{Rey}}+S_v \tag{2.1.3}$$

$h(t,x,y)$は水深、$u(t,x,y)$、$v(t,x,y)$は水深平均流速である。H(t,x,y)は水位であり、河床標高 z(x,y)を用いて H=h+z で与えられる。式の右辺各項は、降雨・浸透/蒸発による水深の増減(S_h,S_u,S_v)、コリオリ力$(F_{u,col},F_{v,col})$、底面摩擦$(F_{u,fric},F_{v,fric})$、乱流粘性応力$(F_{u,Rey},F_{v,Rey})$の作用を表したものであり、次節以降に詳しく述べる。

2.1.2. 離散化手法

2.1.1.で表された浅水流方程式は有限体積法を用いて解くことができる。本モデルでは等間隔直交格子を用いて矩形 2 次元領域を離散化する。格子分割が容易であるだけでなく、土地利用のデータや数値標高データなどのグリッド状のデータとの対応をつけやすいメリットがある。 [11]フラックスの計算には、Roe の近似リーマン解法 [12]を採用した。

2.1.3. 降雨・浸透/蒸発

式のS_hは「降雨による水深の増加」と「浸透/蒸発による水深の減少」による単位時間あたりの水深の変化速度を表すものであり、単位時間当たりの実績降雨量$P_r[mm/s]$、土壌への浸透速度$I_n[mm/s]$、蒸発速度$E_v[mm/s]$を用いて、

$$S_h=P_r-(I_n+E_v) \tag{2.1.4}$$

で表される。土壌への浸透速度I_nは飽和透水係数$k[mm/s]$を用いて与えることができると考えられる。土壌の浸透速度や蒸発速度が不明な場合、土地利用形態ごとの流出係数$C[-]$を用いて、降雨強度から算出することも行われる。

$$S_h = C \times P_r \tag{2.1.5}$$

式(2)と式(3)のS_uとS_vはS_hによる水深の増減が流速に与える影響であり、降雨において供給する運動量(hv)は変化しないこと、浸透/蒸発が流速の変化しないことを仮定すると、以下のようになる。

$$S_u = -(I_n + E_v)u \tag{2.1.6}$$

$$S_v = -(I_n + E_v)v \tag{2.1.7}$$

2.1.4. コリオリ力

コリオリ力($F_{u,col}, F_{v,col}$)は以下のように与えられる。

$$F_{u,\mathrm{col}} = f_c h v \tag{2.1.8}$$

$$F_{v,\mathrm{col}} = -f_c h u \tag{2.1.9}$$

ここではf_cはコリオリパラメータであり、対象地域の緯度$\emptyset_{tat}[rad]$、地球の自転角速度$\omega_{earth} = 7.29 \times 10^{-5}[rad/s]$から以下のように与えられる。

$$f_c = 2\omega_{\mathrm{earth}} \sin(\phi_{\mathrm{lat}}) \tag{2.1.10}$$

2.1.5. 底面摩擦

底面摩擦($F_{u,fric}, F_{v,fric}$)はマニングの粗度係数を用いて、以下のように計算される。

$$F_{u,\mathrm{fric}} = -g\frac{(n^*)^2}{h^{1/3}} u\sqrt{u^2 + v^2} \tag{2.1.11}$$

$$F_{v,\mathrm{fric}} = -g\frac{(n^*)^2}{h^{1/3}} v\sqrt{u^2 + v^2} \tag{2.1.12}$$

2.1.6. 渦粘性

乱流粘性応力($F_{u,Rey,}, F_{v,Rey}$)は渦粘性係数ν_tを使用し、以下のように計算される。

$$F_{u,\mathrm{Rey}} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{2.1.13}$$

$$F_{v,\mathrm{Rey}} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}\right) \tag{2.1.14}$$

渦粘性係数ν_tの決定には幾つかの方法がある。本モデルでは定数を設定する方法を利用している。定数を設定する場合には、Richardson の 4/3 乗則 [13]などから格子サイズ L よりν_tを算出し、計算領域全域で用いる。

$$\nu_f = C \times L^{\frac{4}{3}} \tag{2.1.15}$$

$$C = 0.01 \times 10^{0.4\times(3-2)} = 10^{-2} \times 10^{\frac{4}{3}} = 10^{-10/3} = 0.000464159 \quad (2.1.16)$$

2.2. GPGPU による計算高速化処理

2.2.1. GPGPU の概要

GPGPU とは、画像処理を高速に行う GPU(Graphic Processing Unit)を利用して、様々な目的で使用することの総称である。本研究では、GPU を用いた並列計算によって計算を高速化させる手法を指す。一般に、GPU は出力する画像を作成するための膨大な計算を処理するため、SIMD（Single Instruction Multiple Data）を適用している。そのため、非常に多くの演算処理ユニットが GPU に組み込まれている。GPGPU の概要は図 2 [14]のようになる。

本研究で使用する数値流動モデルの開発で、村上は NVIDIA 社が提供する Tesla シリーズを GPU として使用した。NVIDIA の GPU では GPU の最小の演算単位を「CUDA コア」と呼ぶ。2016 年に発売された「Tesla P100」モデルの場合、GPU には 56 個の SMs(Streaming Multiprocessors)が搭載されている。各 SM は 64 個の CUDA コアで構成されている。そのため、GPU には合計 56×64=3,584 個の CUDA コアが含まれている。CPU に比べて非常に多くの計算コアを保持していることがいえる。

NVIDIA 社は GPGPU の並列処理ように「CUDA」と呼ばれる総合開発環境を提供している。CUDA では CPU からビデオメモリに変数の数値が転送した後に GPU で計算が行われ、出力を行う時に GPU から CPU へ結果が返される。このビデオメモリに SM がアクセスすることは可能であるが、その速度は非常に低速であるために、より高速でアクセスができる共有メモリに必要なデータを確保し、できる限り SM 内で計算を完結させることが計算の高速化において重要である。

2.2.2. GPGPU による計算高速化の効果

村上 [15]は GPGPU による高速化処理の効果を示すために、CPU を用いた計算と GPU を用いた計算の速度にどれほど差異があるのか評価を行っている。2 次元数値流動モデルをカンボジアのトンレサップ湖全域に適用して計算期間 6 時間としたときに計算終了までに CPU では約 1800 秒を要したのに対し、GPU では約 49 秒程度であった。本研究では、5m と非常に細かいメッシュで計算をするため、計算に時間を要する。この点で、GPGPU による高速化処理は本研究において非常に有用である。

図表集

第 2 章

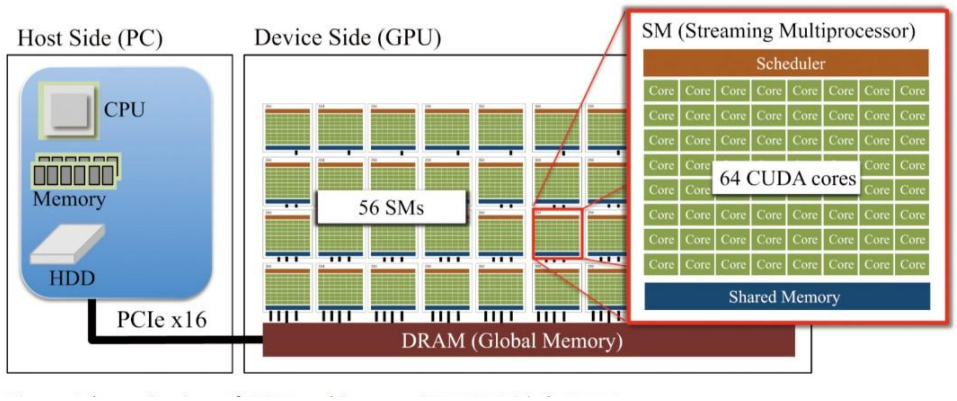

図 2.2.1　GPGPUの概要（文献[13]より転載）

第3章. 福岡県柳川市の内水氾濫のモデル化

3.1. 研究対象区域の概要

今回の研究対象地域である福岡県柳川市は福岡県南部、筑後平野の南西端に位置し、市域の南西は有明海に面している。西部に筑後川、東部に矢部川がそれぞれ流れており、市域の中央部には矢部川の支流である一級河川（県管理）の沖端川、塩塚川が流れている。沖端川、塩塚川はそれぞれ有明海に注いでいる。有明海は最大 6m の干満差をなすため、台風や豪雨時が満潮と重なった場合、降った雨を河川へ流れ出せなくなり、内水氾濫が発生しやすくなる。 [16]

柳川市は縦横を城下町由来の水路（掘割）が張り巡らされており、総延長は 800 ㎞を越える。 [17]掘割には大雨の際に雨水を一時、貯水して内水氾濫を防ぐ遊水機能を有している。 [18]柳川市では平成 27 年から豪雨対策として大雨が予想される際には水路の貯水を事前に減らす、「先行排水」に本格的に取り組んでいる。 [19]

柳川市の風水害の履歴から、古来より柳川市は台風と集中豪雨による建物浸水の被害が多い。緊急排除水門の増改築、緊急排水ポンプの増設等により、被害は減少しているものの依然として浸水被害が発生している。平成 24 年 7 月 14 日の九州北部豪雨では、7 月 11 日～14 日の期間で 415 ㎜の降水量を記録し、1 時間の最大雨量は 81.5 ㎜と過去最大の降水量を記録し、沖端川、矢部川で堤防が決壊したことで浸水被害が発生した。 [20]令和 2 年 7 月 6 日～7 日に発生した大雨では 7 月 6 日 8 時から 7 月 7 日 7 時までの 24 時間雨量が 361.5 ㎜を記録し、過去最大の降水量であった。内水による床上浸水は 4 世帯、床上浸水は 116 世帯に上り、被害額は約 3 億 7 千万円であり、浸水被害も最大規模である。柳川市役所建設課長の口述 [21]によれば、有明海の満潮時刻と重なったことで河川への排水はできなかったものの、クリークの先行排水や揚水機の稼働などは行われた。

柳川市の下水道は分流式になっており、汚水と雨水は完全に分離されている。雨水は下水道管に接続できず、水路などに放流される。 [22] [23]

3.2. ハザードマップの作成手順

モデル化するにあたって、一般的な作成手順から必要なデータや検討すべき事項について調査を行った。国土交通省の内水浸水想定区域図作成マニュアル（案）を参考に内水ハザードマップの作成に必要な事項を調べた。 [4]内水浸水想定区域は、想定最大規模の降雨が発生した際に、下水道の排水施設の能力不足や河川等の水位上昇に伴い当該雨水を排水できない場合に、浸水の発生が想定される区域や実際に浸水が発生した区域を指す。内水浸水想定区域には、外水氾濫、津波や高潮による浸水は含まない。

内水浸水想定を行う場合には想定され得る最大のリスクが生じた場合の浸水シナリオを設定する必要がある。浸水シナリオの設定には過去の内水氾濫が生じた際の実績を踏まえて選定する。

内水浸水想定区域図は大まかに①基本方針を検討し、②内水浸水想定区域図を作成する流れで行う。以下に各フローについて説明する。

① 基本方針の検討

ここでは内水浸水想定区域図を作成するに当たっての、基本方針を立案する各種調査、分析を行う。まず、基礎調査を行い、その結果を踏まえて排水区域の特徴を把握する。そして、内水浸水想定区域図を作成するに当たっての基本方針を検討し、その方針に基づいての基本緒元を設定する。

基礎調査では排水区域の特徴の把握や基本方針の検討をするために、(1) 浸水実績及び降雨観測データ、(２) 地形、地盤高、(3) 土地利用の状況、(4) 放流先の状況等を調査する。基礎調査から得られた、地形や土地利用、既存施設の排水能力、放流先の流下能力と過去の浸水被害の発生状況や浸水想定区域との関係を地形的要因や排水能力等の観点から総合的に分析する。基本方針に基づいて、内水浸水想定区域図を作成するための浸水想定手法の選定や対象降雨、対象区域などの基本的な緒元を設定することで、浸水想定のシナリオを作成する。対象降雨には想定最大規模の降雨や対象の地域の過去に浸水が発生した降雨や既往最大降雨等から設定する。

② 内水浸水想定区域図の作成

ここでは上記の基本方針を踏まえて内水浸水想定手法を選定し、内水浸水想定区域図を作成する。一般に降雨損失、表面流出、管内水理、氾濫解析の一連の解析を行う浸水シミュレーション手法を行うことが推奨されているが、管きょの断面形状、集水面積等の情報の把握に時間を要する場合には、簡易的な手法や浸水実績を活用した手法を基にすることも可能である。

簡易モデルでは降雨損失モデルと氾濫解析モデルを組み合わせて解析を行う。簡易手法を適用する場合には、浸水シミュレーション手法と同様に、氾濫解析におけるメッシュサイズは 25m 以下を基本とする。また、管内水理モデルを省略しているため、氾濫後の排水がモデルに反映できない。そのため、浸水継続時間を直接算出することができないことに留意が必要である。

今回のモデルでは浸水シミュレーションに内水氾濫が実際に発生した令和 2 年 7 月豪雨の降雨量データ、国土地理院の 5m メッシュの基盤地図情報を使用する。柳川市は縦横に水路が張り巡らされており、水路には雨水を貯める遊水機能がある。そのため、水路網のデータを作成し、用いる。

3.3. 計算用データの作成

3.2.1.節で述べたように計算を行うにあたって必要になるデータは地形データ、降雨量データ、堤防のデータ、水路網のデータ、流出係数、マニングの粗度係数、蒸発量の 6 種類である。

3.3.1. 地形データ

① 標高マップ

国土地理院の 5m メッシュの数値標高モデル（以下では DEM データ）を用いた。DEM データの観測年は令和 1 年（2019）である。

② 土地種別データ

土地を水域、建築物、道路、田園、その他に区別する。水域、建築物、道路は国土交通省の基盤地図情報の基本項目の水域データ、建築物データ、道路縁のデータをそれぞれ利用した。データの観測年は令和 6 年（2024）である。

田園のデータは国土交通省が提供している 100ｍメッシュの土地利用種別データを利用した。データの作成年は令和 3 年（2021）である。

水域、建築物、道路、田園に該当しなかった該当箇所をその他として分類した。

3.3.2. 堤防のデータ

今回は川下りに使われる掘割を含む、沖端川の左岸と塩塚川の右岸に囲まれたエリアを研究対象とした。堤防のデータは DEM データを用い、GIS 上で作成した。

3.3.3. 降雨量データ

近年で最も浸水被害の大きかった令和 2 年 7 月豪雨を含む、2020 年 7 月 5 日～7 月 12 日までの気象庁が提供している柳川市の 1 時間ごとの降雨量のデータを利用した。

3.3.4. 水路データ

水路に関して、Google map の航空写真のデータをもとに目視でプロットした。水路始点の水路の最小幅、最大幅は衛星写真上で 0.1ｍ単位での計測をした。水路勾配は土地改良施設管理図に記載されている該当区域の水路勾配 [24]が 1/5000 であることから一様に 1/5000 とした。水路始点の標高、掘削高は一様に 2m とした。

DEM データでは水路の上に橋などが架かっており、陸地を通過する場合、水路が分断されているようになり、水域と判定されない。そのため、最小幅を設定することで土地利用マップを変更し、最小幅の水域が確保されるように設定した。

3.3.5. 流出係数

流出係数は国土交通省の「河川砂防技術基準　調査編」に記載されている値を利用した。[25]建築物に関して、一般市街地（25%）の流出係数は 0.8、密集市街地（50%）の流出係数は 0.9 とされていたため、平均した 0.85 を値として用いた。流出係数の設定値は表 3.3.5-1 のようになる。

3.3.6. マニングの粗度係数

マニングの粗度係数は国土交通省の中小河川を対象とした洪水はん濫計算の手引きに記載されている値を用いた。 [26]建築物に関して、一般市街地（25%）の粗度係数は 0.10、密集市街地（50%）の流出係数は 0.15 とされていたため、平均した 0.125 を値として用いた。マニングの粗度係数の設定値は表 3.3.6-1 のようになる。

3.3.7. 蒸発量

蒸発量は古賀 [27]らの土地利用種別ごとの蒸発散量を用いた。蒸発散量の設定値は表 3.3.7-1 のようになる。

3.4. 計算条件の設定

3.4.1. 境界条件

計算領域の外縁における境界条件を設定する。流出境界では、境界面に接する計算セルではマニングの粗度係数n^*と水位勾配 I から計算される等流状態の流速を持った流れが、境界面から流出する方向に設定される。ここで R は径深である。

$$\boldsymbol{u = -\frac{1}{n^*} R^{2/3} I^{1/2}} \tag{3.4.1.1}$$

3.4.2. 時間刻み幅

各時間ステップにおいて時間刻み幅を設定するために CFL を利用する。各時間ステップにおける最大の CFL 数（C_{CFL}）を指定し、時間刻み幅Δtを以下の条件を満足する最大値に自動で設定する。負の水深を避け、水体積の保存性を保証するためにこの値は 0.25 以下でなければならない。

$$\boldsymbol{\Delta t < C_{CFL} \times \min\left(\frac{\Delta x}{|u_{ij}| + \sqrt{g h_{ij}}}, \frac{\Delta y}{|v_{ij}| + \sqrt{g h_{ij}}}\right)} \tag{3.4.2.1}$$

図表集

第 3 章

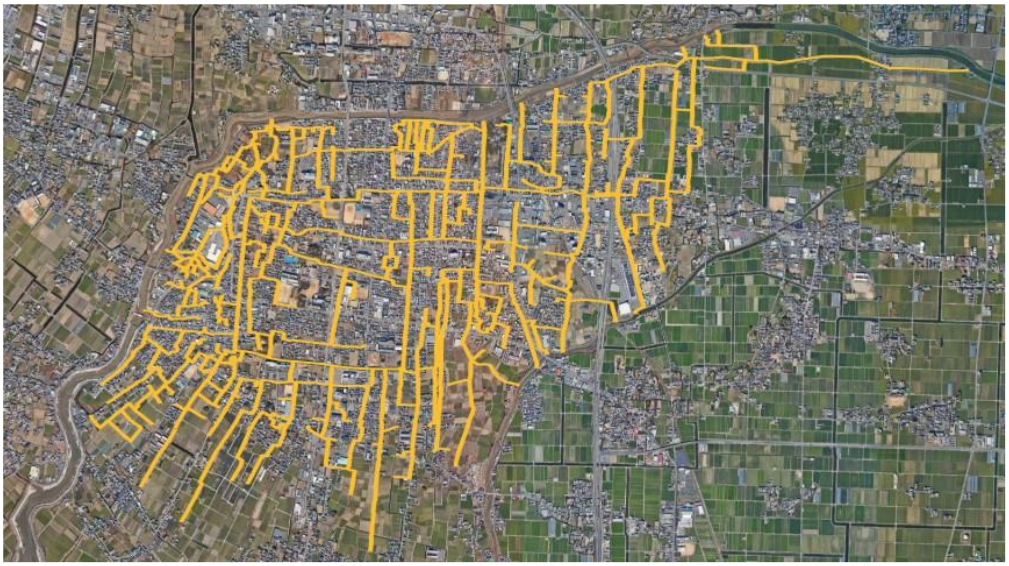

図 3.3.4.1　水路データ作成図

表 3.3.51　流出係数の設定値

分類	流出係数
水路	1.0
建築物	0.85
道路	0.85
田	0.7
その他	0.7

表 3.3.61　マニングの粗度係数の設定値

分類	マニングの粗度係数
水路	0.025
建築物	0.125
道路	0.047
田	0.06
その他	0.05

表 3.3.7-1　蒸発散量の設定値

分類	蒸発散量[mm/hr]
水路	2.9×10^{-8}
建築物	5.1×10^{-9}
道路	5.1×10^{-9}
田	1.0×10^{-8}
その他	7.3×10^{-9}

第4章. 令和 2 年 7 月豪雨の再現計算

4.1. 対象区域・対象期間

対象域は柳川市の中心地である柳川城の跡地である城堀を含む、沖端川の左岸と塩塚川の右岸に囲まれたエリアとする。対象面積は 5,074,987 ㎡で、格子間隔は 1m である。対象区域図は図 4.1.1 であり、土地利用ごとのグラフは図 4.1.2 である。

計算期間は令和 2 年 7 月 5 日 0 時から 7 月 12 日 24 時までの 8 日間を対象とした。一時間ごとの降雨量の推移は図 4.1.3 の通りである。

4.2. 計算結果

対象期間の降水量のピークは 7 月 6 日の 11 時から 17 時にかけて、7 月 7 日の 19 時台、7 月 10 日の 14 時から 15 時にかけての 3 回で 1 時間あたり 30 ㎜以上の非常に激しい雨が降った。降雨量の状況によって、表 4.2-1 の通りに観測時間を設定した。

水害ハザードマップ作成の手引き（図 4.2.2 [28]）を参考に浸水深ごとに色分けをした各時間の浸水状況は図 4.2.3 から図 4.2.13 の通りになる。

内水マニュアルに沿った区分で浸水域を表示する。図 4.2.14 は 1 ㎝～30 ㎝までの浸水域、図 4.2.15 は 30～50 ㎝までの浸水域、図 4.2.16 は 50cm～1m までの浸水域である。図 4.2.17 は、国土交通省の川の防災情報 [29]を参考に、10 ㎝単位でより細かく区分した最大浸水図である。水害ハザードマップ作成の手引き（図 4.2.18 [28]）によれば、水位がふくらはぎ（約 20ｃｍ）のあたりまで到達すると半数の人が、避難が困難になり、膝の高さ（50 ㎝）に到達するとほとんどの人が、避難が困難になる。自動車の走行に関しては 10 ㎝以上でブレーキ性能が低下するため、安全な場所へ車を移動させる必要が商事、30 ㎝以上でエンジンが停止する。詳細な最大浸水深の色分けは表の通りである。

現行の柳川市の内水ハザードマップは平成 27 年から令和 4 年までの浸水実績を反映させたものである。そのため、今回対象にした令和 4 年 7 月豪雨の浸水被害もハザードマップに含まれているため、概ね比較することができる。図 4.2.19 は柳川市の内水ハザードマップ [30]、図 4.2.20 はシミュレーションした最大浸水域のマップである。

沖端川と城堀に挟まれた西側の筑紫町、稲荷町のエリア、城堀の南東の柳川市役所の周辺の浸水が大きいことがハザードマップから読み取ることができる。図 4.2.21 から西側は浸水域が 50 ㎝以上の箇所があることが確認できる。図 4,2,22 から市役所付近は浸水していることが確認できる。今回のシミュレーションは柳川市の内水ハザードマップと概ね一致しているといえる。

内水ハザードマップの浸水深の色分けに従って、最大浸水深の面積は表 4.2.3 のようになる。

図表集

第 4 章

(m)
400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600 2800 3000 3200
2200 2000 1800 1600 1400 1200 1000 800 600 400 200 0
(m)

図 4.1.1　対象区域図

図 4.1.2　土地利用ごとの対象区域図

図 4.1.3　2020年7月5日から12日までの降水量推移

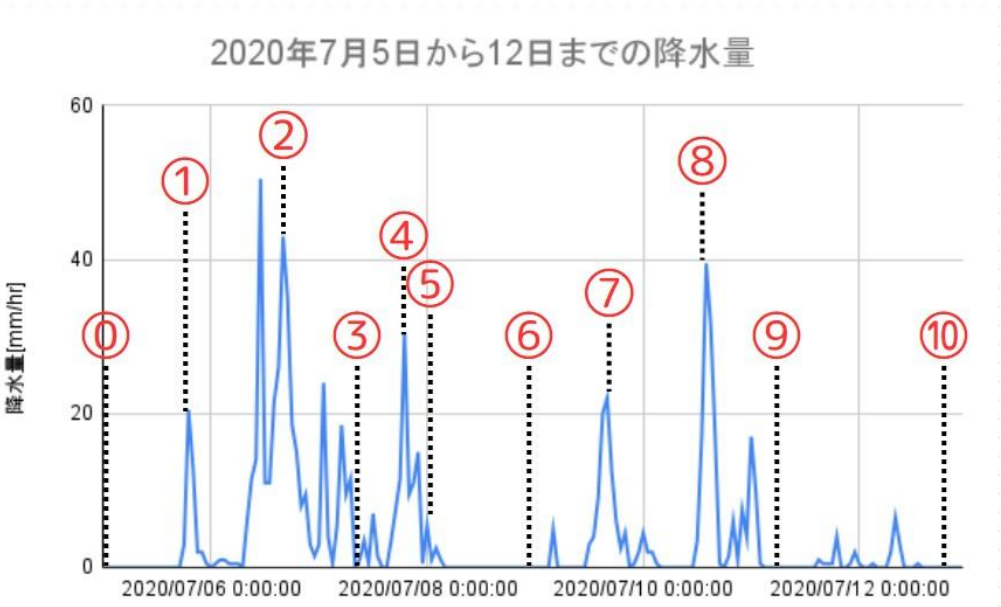

図 4.2.1　観測時点

表 4.2-1　観測時間と状態

番号	状態	日時
0	初期状態	7月5日0時
1	降り始め	7月5日19時
2	1回目のピーク	7月6日16時
3	1回目の降り終わり	7月7日8時
4	2回目のピーク	7月7日19時
5	降水量減少	7月8日0時
6	降り終わり	7月9日１時
7	3回目の降り始め	7月9日16時
8	3回目のピーク	7月10日14時
9	3回目の降り終わり	7月11日14時
10	3回目の降り終わりから24時間後	7月12時14時

浸水深等			詳細版
20m	～		220,122,220
10m	～	20m	242,133,201
5m	～	10m	255,145,145
3m	～	5m	255,183,183
1m	～	3m	255,216,192
0.5m	～	1m	248,225,166
0.3m	～	0.5m	247,245,169
	～	0.3m	255,255,179

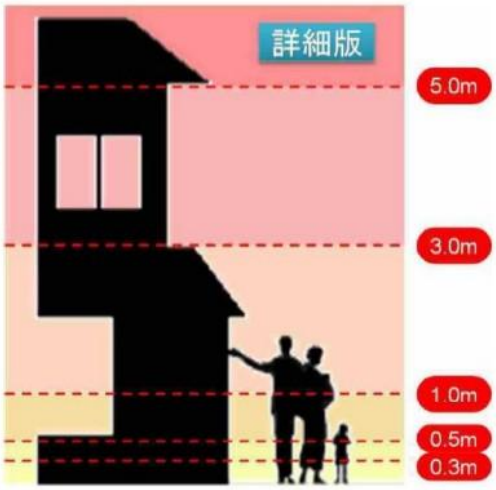

図 4.2.2　内水ハザードマップの浸水深の色分け（文献[26]より転載）

図 4.2.3　⓪　初期状態のマップ

図 4.2.4　①　7月5日19時の浸水域

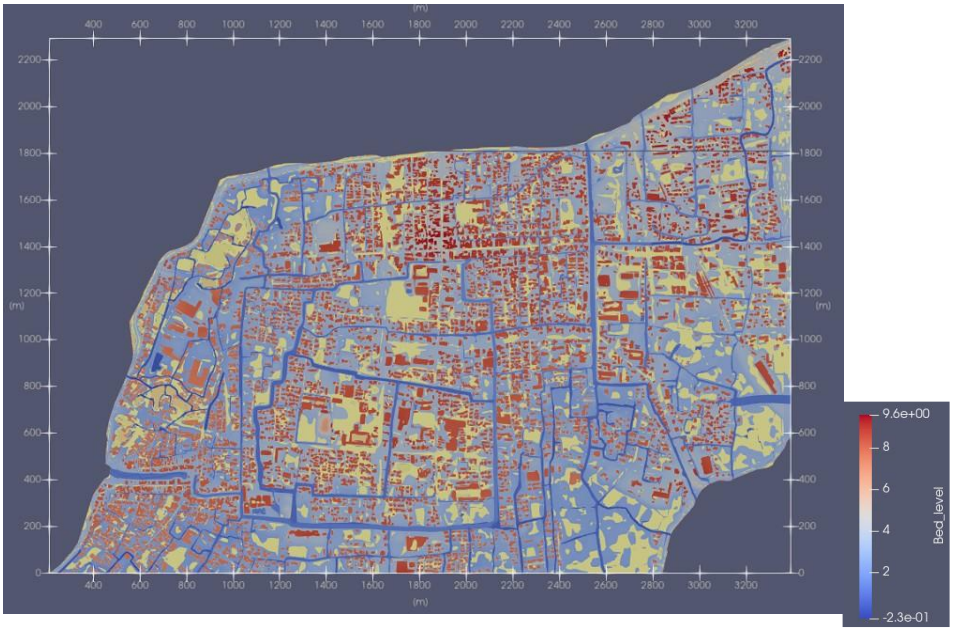

図 4.2.5　②　7月6日16時の浸水域

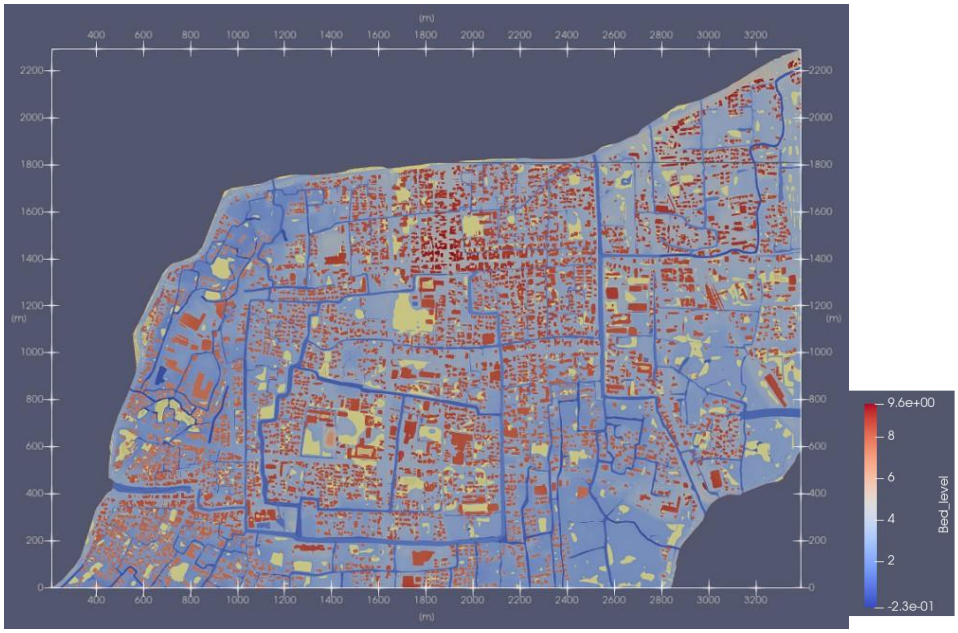

図 4.2.6　③　7月7日8時の浸水域

図 4.2.7　④　7月7日19時の浸水域

図 4.2.8　⑤　7月8日0時の浸水域

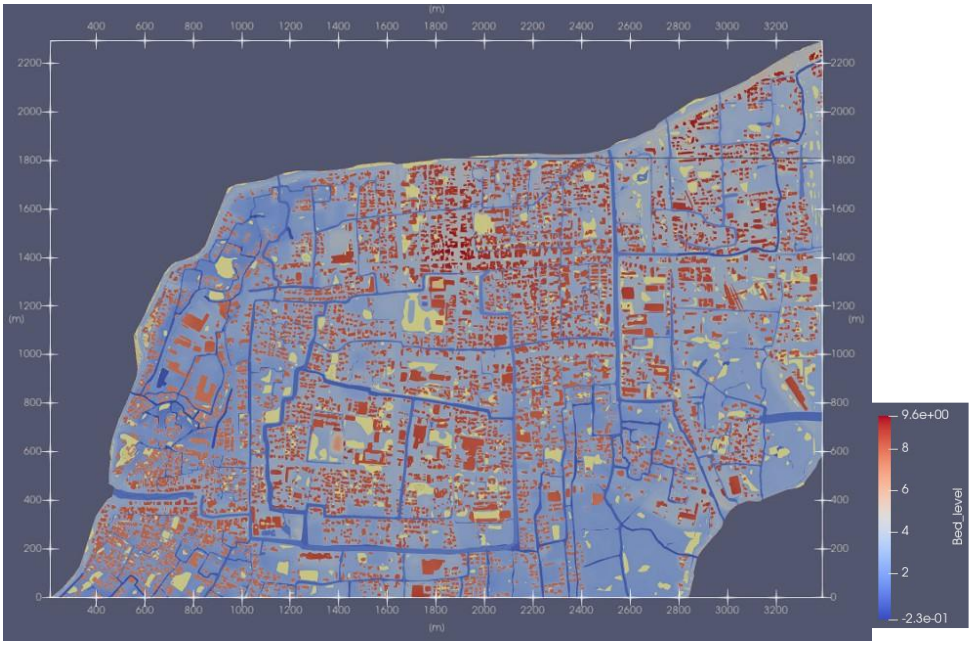

図 4.2.9　⑥　7月9日1時の浸水域

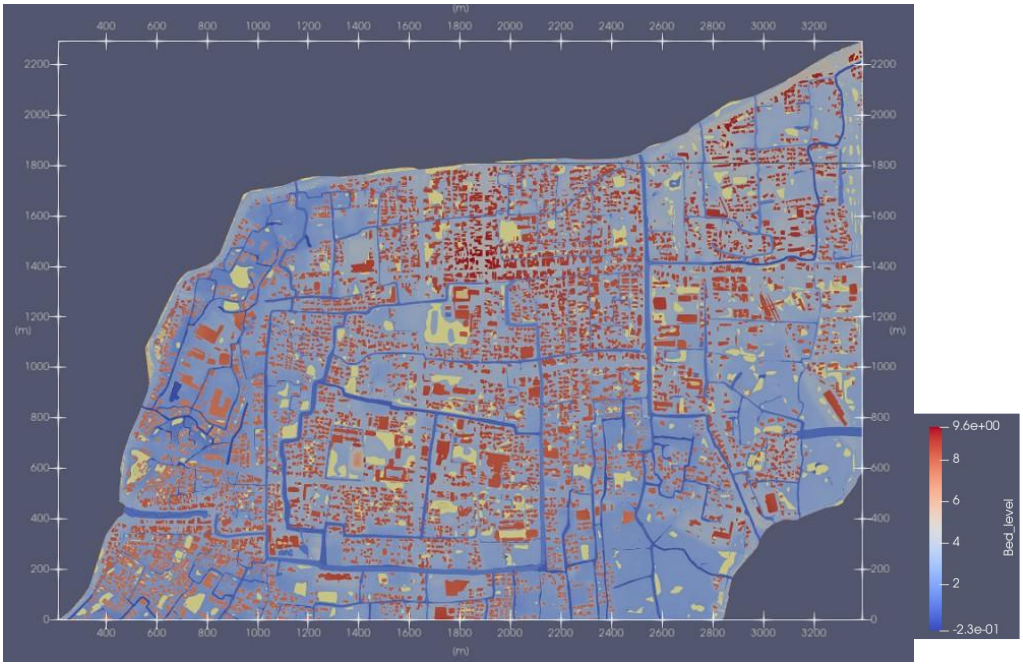

図 4.2.10　⑦　7月9日16時の浸水域

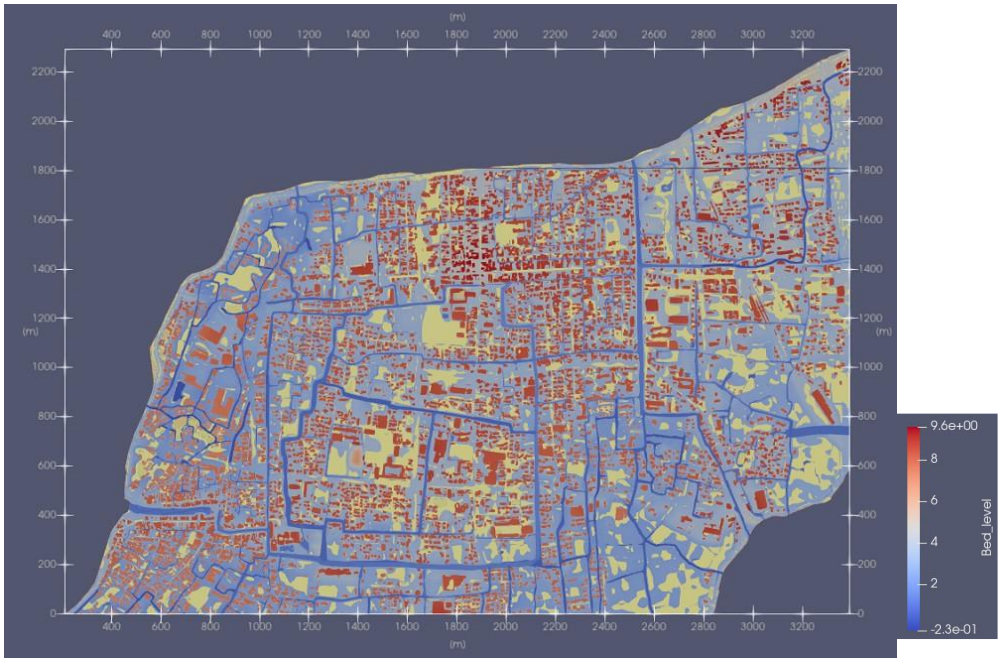

図 4.2.11　⑧　7月10日14時の浸水域

図 4.2.12　⑨　7月11日14時の浸水域

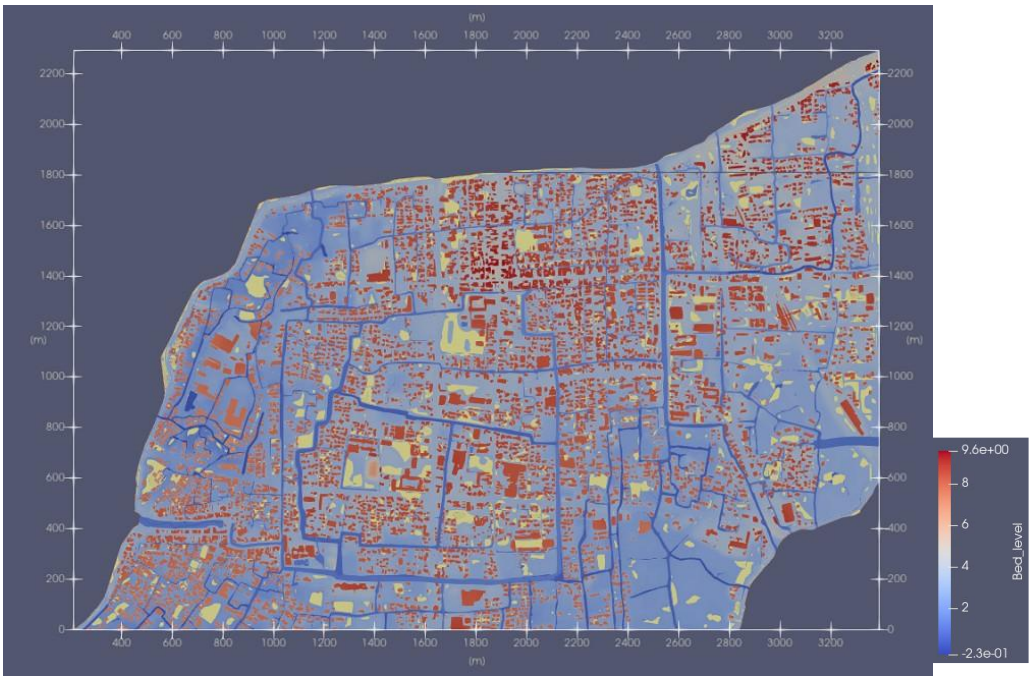

図 4.2.13　⑩　7月12日14時の浸水域

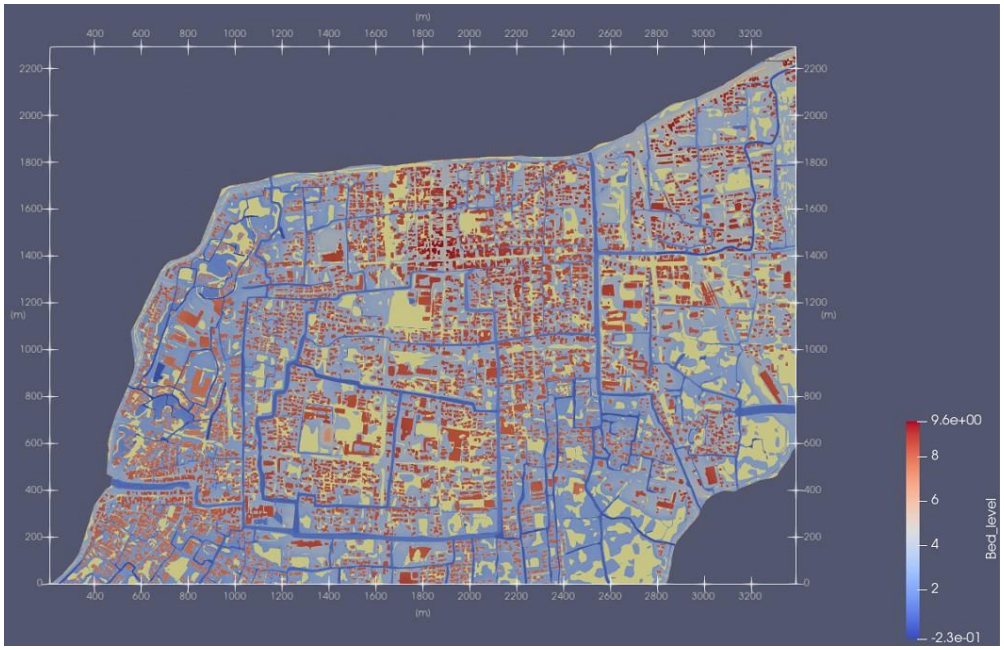

図 4.2.14　1㎝～30㎝の浸水域

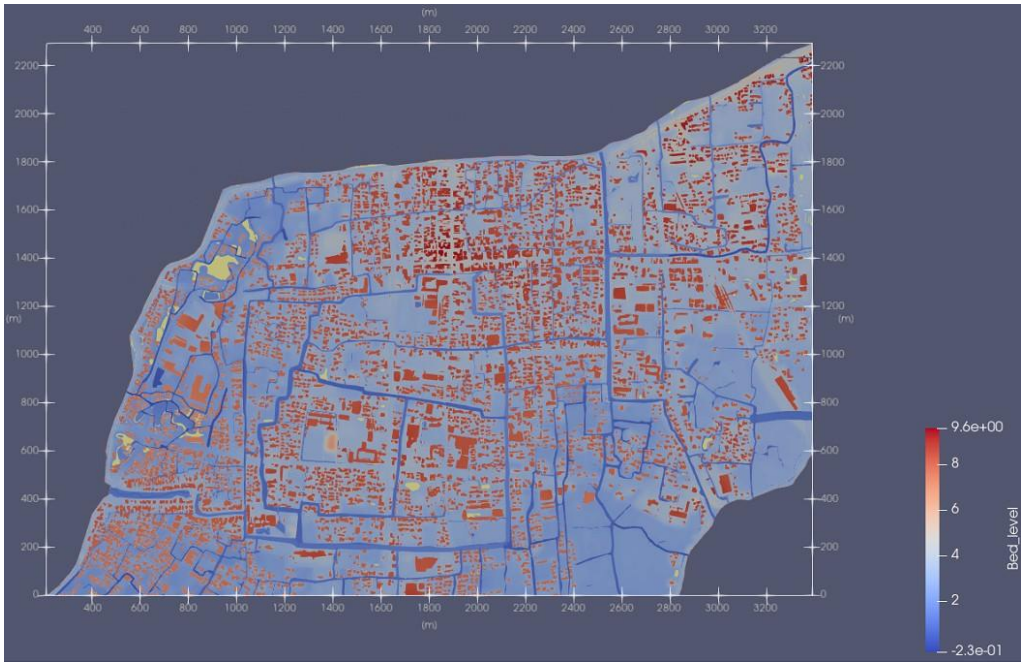

図 4.2.15　30㎝～50㎝の浸水域

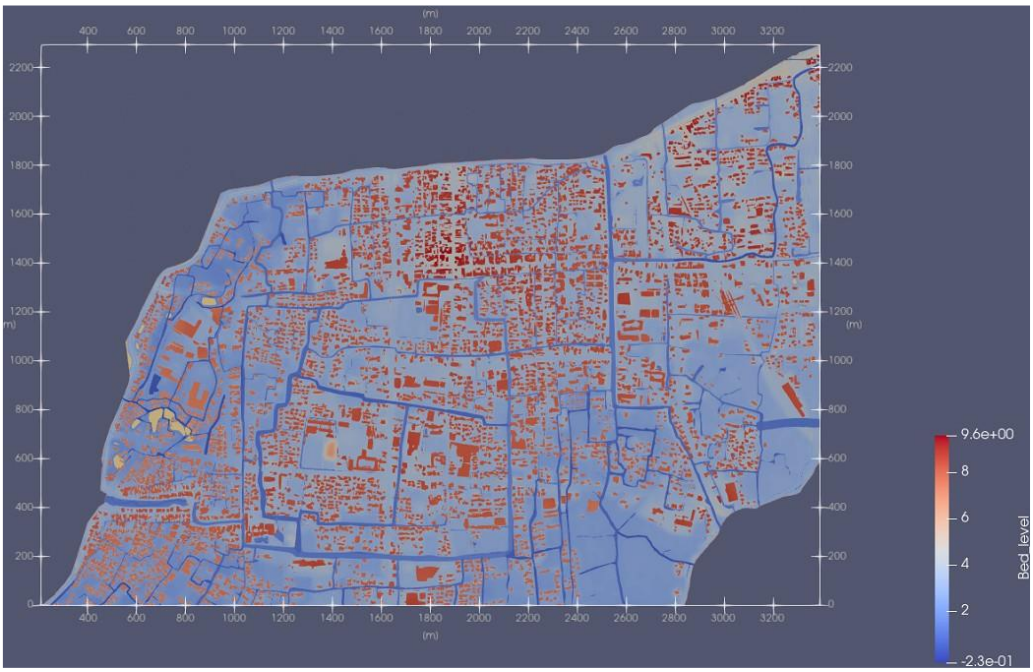

図 4.2.16　50㎝～1mの浸水域

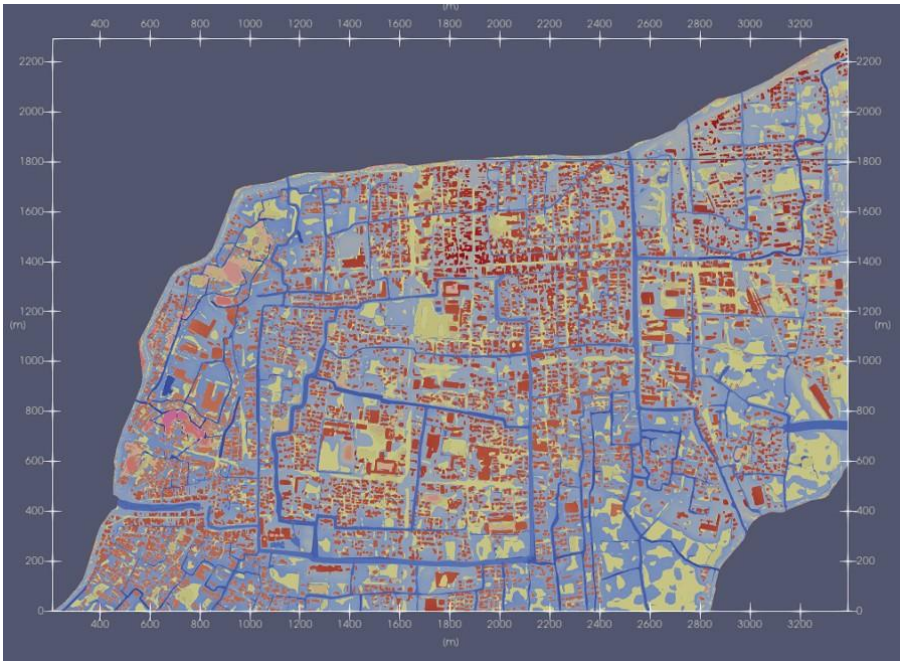

図 4.2.17　詳細な最大浸水図

表 4.2-2　浸水深ごとの色分け

浸水深[cm]	色（RGB）
1～10	255,255,179
10～20	247,245,169
20～30	248,225,166
30～40	255,216,192
40～50	255,183,183
50～	255,145,145

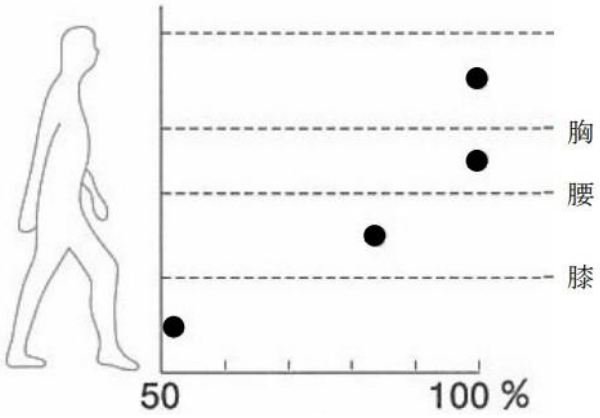

図 4.2.18　避難が困難な人の割合（文献[28]から転載）

図 4.2.19 柳川市の内水ハザードマップ（文献[30]から一部加工）

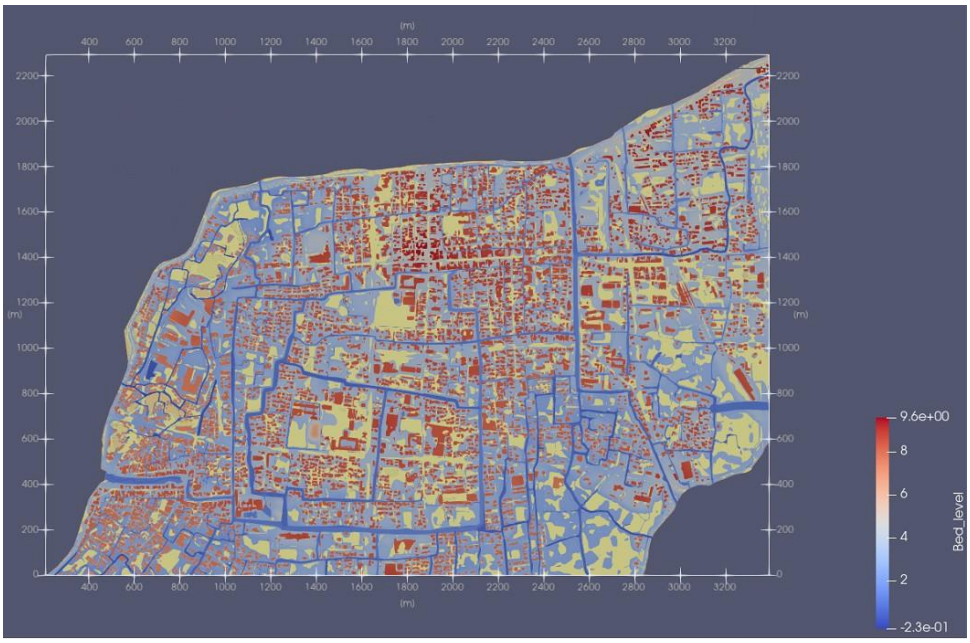

図 4.2.20　シミュレーションした最大浸水域

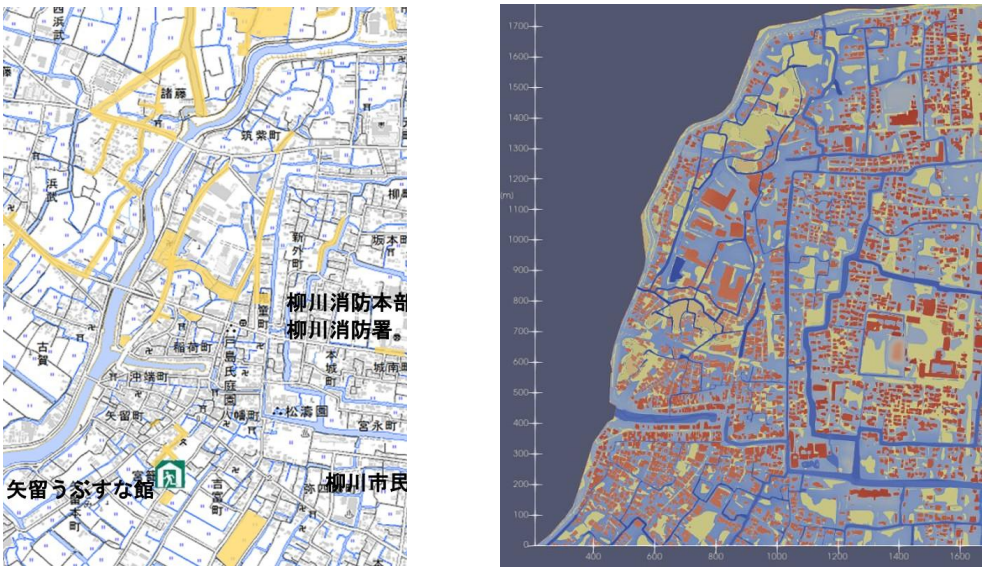

図 4.2.21 柳川市の内水ハザードマップ（文献[30]から一部加工）

図 4.2.22 市役所付近の内水ハザードマップ（文献[30]から一部加工）

表 4.2-3　浸水深ごとの面積

浸水深[cm]	浸水面積[㎡]
1～30	990370
30～50	37554
50～100	15027
計	1042951

第5章. 結論

5.1. 研究の統括

気候変動に伴う、降雨量の増加に対して、短期間豪雨の発生頻度や大雨の降水量の増加が予測されており、内水による浸水の発生頻度が高くなる懸念が高まっている。そのため、内水による浸水のリスクや避難に関わる情報を効果的に住民に提供することが求められており、「内水ハザードマップ」の作成が求められている。福岡県は過去 7 年間で 6 回、大雨特別警報が発令されており、柳川市でも令和 2 年 7 月豪雨では内水氾濫の被害が発生した。

柳川市は縦横を城下町由来の掘割が張り巡らされている複雑な地形をしている。本研究では柳川市の地理的環境に即した水路データを用いた、内水氾濫シミュレーションモデルを開発した。シミュレーション結果と過去最大規模の内水被害に遭った令和 2 年 7 月豪雨の浸水状況と比較をすると、概ね実際の浸水被害地域と一致し、浸水域に関しては良好な再現結果を得た。本モデルでは樋門、排水ポンプの情報を反映させていないため、排水能力が著しく小さく、浸水継続時間の把握には利用できないことがうかがえる。

5.2. 今後の課題

本研究では、福岡県柳川市を対象に内水氾濫シミュレーションを行った。同様の手法で樋門や排水ポンプの情報を反映させることで、より現実に即した状況における内水氾濫シミュレーションが期待できる。また、今回は現地による観測をしなかったが、主要な水路の水路標高や水深の現地調査をすることで、実際の水路に合わせた水路標高に変更することでより精度の高いシミュレーションが期待できる。

また、柳川市では流域治水プロジェクトの一環として、豪雨が予測される前に水路の先行排水を行っている。先行排水を行うと用水や防火用水不足が懸念されるため、農家などの住民から理解を得ることが難しい。水深を小さくしてシミュレーションをすることで先行排水の効果を定量的に示すことができ、排水対策を強化することができると考える。

謝辞

本論文の作成にあたり、中村先生には研究室に配属した当初から、研究の向き合い方から論文の書き方まで丁寧にご指導していただきました。心より深く感謝を申し上げます。

同じ研究室の M2 の松木さん、山本さん、早川さんには、データの整理などにおいて研究に行き詰った際に、快く相談に乗ってくださりました。ゼミの発表内容に対しても助言をいただき、非常に参考になりました。昨年 9 月まで研究室にいらっしゃった殿山さんには研究テーマに対して参考になる論文や研究についてのアドバイスをいただきました。研究室の同期や先輩方には研究のアドバイスだけでなく、研究の進捗具合を気遣っていただき、大変心の支えになりました。ここに感謝いたします。

国土交通省筑後川河川事務所の一村氏には河川の地形データを提供していただきました。

また、柳川市水路課の方々には研究に必要な柳川市の詳細な水路データや地図を提供していただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

[1] 気象庁, “気候変動監視レポート　2023,” 2024.

[2] 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課　経済係, “令和 4 年水害統計調査,” 2024.

[3] 柳川市, “柳川市地域防災計画,” 令和 6 年.

[4] 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, “内水浸水想定区域図作成マニュアル（案）,” 令和 3 年.

[5] 公益財団法人　日本下水道新技術機構, “流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き）,” 2017.

[6] 武田誠, “2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集　都市域における浸水解析,” 土木学会　水工学委員会・海岸工学委員会, 2013 年.

[7] 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　№.698　II -58、1-10, 2002.

[8] 張馳・岩堀康希・阿部真郎・登坂博行, “急勾配地形を有する場における洪水氾濫の数値解析,” 水工学論文集、第 48 巻, 2004.

[9] 福岡捷二, “近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える,” 河川技術論文集, 2022.

[10] 筑後川流域治水協議会・矢部川流域治水協議会, “矢部川水系流域治水プロジェクト 2.0,” 令和 5 年.

[11] 土木学会　水工学委員会　水理公式集編集小委員会　委員長　辻本哲郎, 水理公式集 [2018 年版], 公益社団法人　土木学会, 2018.

[12] P. L. Roe, “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes,” Journal of Computational Physics, Vol.43, 1981.

[13] 池田裕一, 中村由行, 中井正則, 道奥康治, 村上和男, “水圏の環境,” 東京電気大学出版局, 1998.

[14] S. M. L. S. H. F. Takashi Nakamura, “Efficacy of a GPGPU-Acceleration to Inundation Flow Simulation in Tonle Sap Lake in Cambodia,” 2019.

[15] 村上駿, “カンボジア国・トンレサップ湖の流動把握に向けた 2 次元数値流動モデルの開発,” 平成 28 年.

[16] 柳川市防災会議, “柳川市地域防災計画　ー本編ー,” 令和 5 年.

[17] 田嶋宏隆、久米学、小川真由、渡邊俊、内山里美、内山耕蔵、大坪鉄治、古賀春美、亀井裕介、三田村啓理, “福岡県柳川市の掘割における二ホンウナギの生息状況,” 2023.

[18] 柳川市, “掘割を守り育てる行動計画　～「ホタルの飛び交う水郷柳川」を目指して～,” 平成 26 年.

[19] 柳川市役所　産業経済部水路課, “排水対策早わかり　～先行排水の実施について～令和 6 年度版,” 令和 6 年.

[20] 柳川市, “柳川市地域防災計画　-資料編ー,” 令和 5 年.

[21] 中村正光, “柳川市役所HP　部課長の一分間スピーチ　水害に強いまちづくりを目指して,” 2020. [オンライン]. Available: https://www.city.yanagawa.fukuoka.jp/blog-buka/_7843__7844.html. [アクセス日: 17 1 2025].

[22] 柳川市, “柳川市排水設備技術基準　公営企業管理規定第 33 号,” 令和 4 年.

[23] 柳川市　上下水道課, “公共下水道のしおり,” 令和 5 年.

[24] 九州農政局筑後川下流農業水利事務所, “国営筑後川下流土地改良事業　土地改良施設管理図（幹線水路代 1 号線）（排水樋門（観音丸））,” 平成 20 年.

[25] 国土交通省　水管理・国土保全局, “河川砂防技術基準　調査編,” 令和 6 年.

[26] 国土交通省　北海道開発局、独立行政法人　土木研究所　寒地土木研究所, “中小河川を対象とした洪水はん濫計算の手引き（案）,” 平成 26 年.

[27] 古賀達也、川村明、天口英雄、田内裕人, “神田川上流域における土地利用種別毎んお蒸発山稜および地表面温度の推定,” 土木学会論文集 G（環境）、vol.71、No.5、Ⅰ_311-Ⅰ_317, 2015.

[28] 国土交通省水管理・国土保全局　河川環境課水防企画室, “水害ハザードマップ作成の手引き,” 令和 5 年.

[29] 国土交通省, “国土交通省　川の防災情報　浸水深と避難行動について,” [オンライン]. Available: https://city.river.go.jp/kawabou/reference/index05.html. [アクセス日: 22 1 2025].

[30] 柳川市, “柳川市　内水ハザードマップ①,” 令和 4 年.