4. シミュレーションモデルの構築

目　次

4. シミュレーションモデルの構築 4-1

4.1. 目的及び氾濫の特徴 4-1

4.2. シミュレーションモデルの概要 4-3

4.3. シミュレーションモデルの基礎式等 4-5

4.4. シミュレーションモデルの構築 4-8

4.4.1. 流域分割 4-8

4.4.2. 流出モデル 4-9

4.4.3. 氾濫原モデル 4-11

4.5. 浸水に関する情報収集 4-15

4.5.1. 雨（降雨データ） 4-16

4.5.2. 河川 4-20

4.5.3. 下水道 4-23

4.5.4. 氾濫原（地形） 4-26

4.6. 再現計算 4-28

4.6.1. 再現計算の妥当性確認 4-28

4. シミュレーションモデルの構築

「3.今次水害の概要」で記載したとおり、モデルを用いた解析等により、災害検証を行うこととした。モデルは、次の留意点に踏まえて構築し、客観データを用いて再現性が確認された。

（検証に用いるモデルに関する留意点）

- 降雨に関する情報は、地上雨量計のほか、レーダ雨量等の詳細なデータを含めて収集し、適用を検討する。
- カメラ映像の解析や地域への聞き取り（ヒアリング）等により、浸水状況に関する情報の収集に努める。
- 特に延長数mの高さ不足を扱う範囲は、精緻な解析により、浸水の原因と影響を評価する必要がある。
- モデルによる解析は、再現性に限界がある（表現出来るもの と 出来ていないものがある）ことに留意する。
- ケーススタディにより、これまでの治水対策効果をしっかり示す必要がある。

4.1. 目的及び氾濫の特徴

上記留意点を踏まえ、モデル構築にあたり、目的や氾濫特徴を整理する。

（目的）

① 茂原市街地における内外水による浸水状況の再現
② 今後の流域治水のあり方を検討するための河川整備などによる効果の検証
③ 仮締切堤防高さ不足による影響の検証

（氾濫特徴）

① 低平地以外・農地が多い郊外では、主に河川から氾濫
⇒河川氾濫をモデルで表現
② 低平な市街地では、河川氾濫と下水道からの内水氾濫が混在
⇒河川氾濫に加え、下水道管内の流れやマンホールからの内水氾濫もモデルで表現

これらから、モデルを以下のとおり構成するものとした。

- 河川整備による効果等を検証するため、
  ① 流域全体は河川氾濫モデルをベースとしつつ、
  ② 仮締切堤防高さ不足区間は低平な市街地であるため、その影響の評価にあたっては、内水氾濫モデルを組み込む。
- 客観データ（写真、動画等）により、モデルの妥当性を確認する。

目的に応じたシミュレーションモデルの構築

（第１回検証会議における委員意見）

■ **目的や氾濫の仕方を踏まえて、モデル**を組む必要がある。

■ **客観的事実**に基づき、**検証**を行う。

（目的）① 茂原市街地における内外水による浸水状況の再現

② 今後の流域治水のあり方を検討するための河川整備などによる効果の検証

③ 仮締切堤防高さ不足による影響の検証

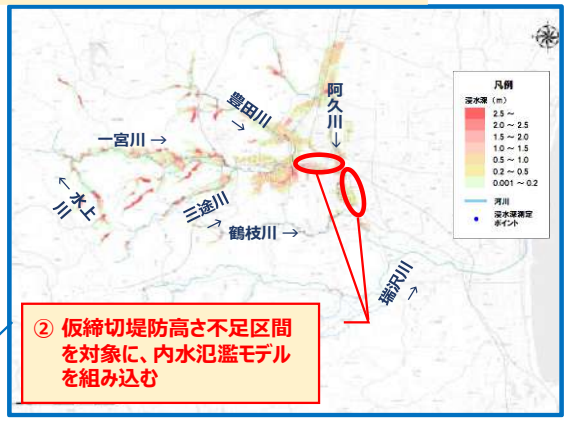
（氾濫）① 低平地以外・農地が多い郊外では、主に河川から氾濫→ 河川氾濫をモデルに反映

② 低平な市街地では、河川氾濫と下水道からの内水氾濫が混在

→ 河川氾濫に加え、下水道管内の流れやマンホールからの内水氾濫をモデルに反映

■ 河川整備による効果等を検証するため、
流域全体は河川氾濫モデルをベースとしつつ、
仮締切堤防高さ不足区間は低平な市街地であるため、
その**影響の評価**にあたっては、**内水氾濫モデル**を組み込む。

■ **客観データ（写真、動画等）**により、**モデルの妥当性を確認**する。



① 流域全体を対象とした河川氾濫モデル

② 仮締切堤防高さ不足区間を対象に、内水氾濫モデルを組み込む

4.2. シミュレーションモデルの概要

モデルについて、以下のとおり構築した。なお、十分な再現性の確認のために、今次浸水に関する情報を収集し、キャリブレーションを行うことで精度を確保した。

① モデルの概念

大きく分けて次の 3 つのモデルを組み合わせて一体的に解析することとした。

- 河川、下水道流出モデル
  山地、市街地に降った降雨が河川、下水道に流入する過程を計算
- 河川、下水道追跡モデル
  河川、下水道内の流れを計算
- 氾濫モデル
  河川、下水道から市街地や農地などに溢れた水が流れる現象を計算

② 計算手法

河　道：一次元不定流解析（河道条件は下記河道モデルの R5.9 時点）

氾　濫：平面二次元不定流解析

下水道：スロットモデルによる一次元不定流解析（マンホールを介して地上と下水道管渠網をやり取り）

管路流れの非圧縮性流体の一次元非定常流

③ 河川、下水道流出解析モデル

流出解析は一宮川を 47 小流域に分割し、流域流出量を貯留関数法により算定した。なお、再現性向上のため、洪水実績を用いて Rsa（飽和雨量）で調整を行った。

下水道への流出は、当該流域の貯留関数のマンホール毎の小流域分割による流量を管渠に直接与えている。これにあたりマンホール毎の集水面積、集水範囲の流出係数等を入力している。

なお、小流域ごとの雨量は、地上雨量局箇所によるティーセン分割とティーセン係数により算定した。この手法は、後述するレーダ雨量計観測値との比較を行った結果、より再現性の高い方を選んで決定している。

④ 河道追跡モデル

千葉県管理河川（一宮川水系一宮川、三途川および鶴枝川、阿久川、豊田川、水上川の一部）をモデル化。なお、仮締切堤防の高さ不足区間や変状区間については、断面に区間延長の要素を追加してモデルに反映。越水時は横越流モデルで表現。

これに加えて、県管理以外の河川、水路（本台川、梅田川、西谷川、鹿島川や河川に接続する水路の一部）をモデル化し、県管理河川に対する内水河川の一部も河道として表現する。

※ 河川構造物の扱い

水門・樋門・排水機場をモデル化し、洪水時の排水機場の運転状況を反映

一宮川第一調節池、一宮川第二調節池（既設及び暫定供用部分）、阿久川調節池をモデル化

⑤ 下水道追跡モデル

八千代地区、大芝地区のうち、氾濫実績が確認された範囲の管網（管渠の位置、形状、断面寸法、延長、接続高さ、接続している人孔、粗度係数等）、マンホール位置、形状、断面寸法、マンホール天端高、底高、河川吐口への分水人孔、吐口、排水機場の諸元をモデル化。管網計算を行い、マンホールを介して地上の地表面氾濫流計算とやり取りを行う。

下水道モデルを組み込む対象範囲のうち、八千代地区については、管理者である茂原市からモデル提供を受け、マンホール地表高の実測で補正してモデルに活用した。

大芝地区については、下水道台帳の提供を受け、本検証のためにモデル化をして組み込んだ。

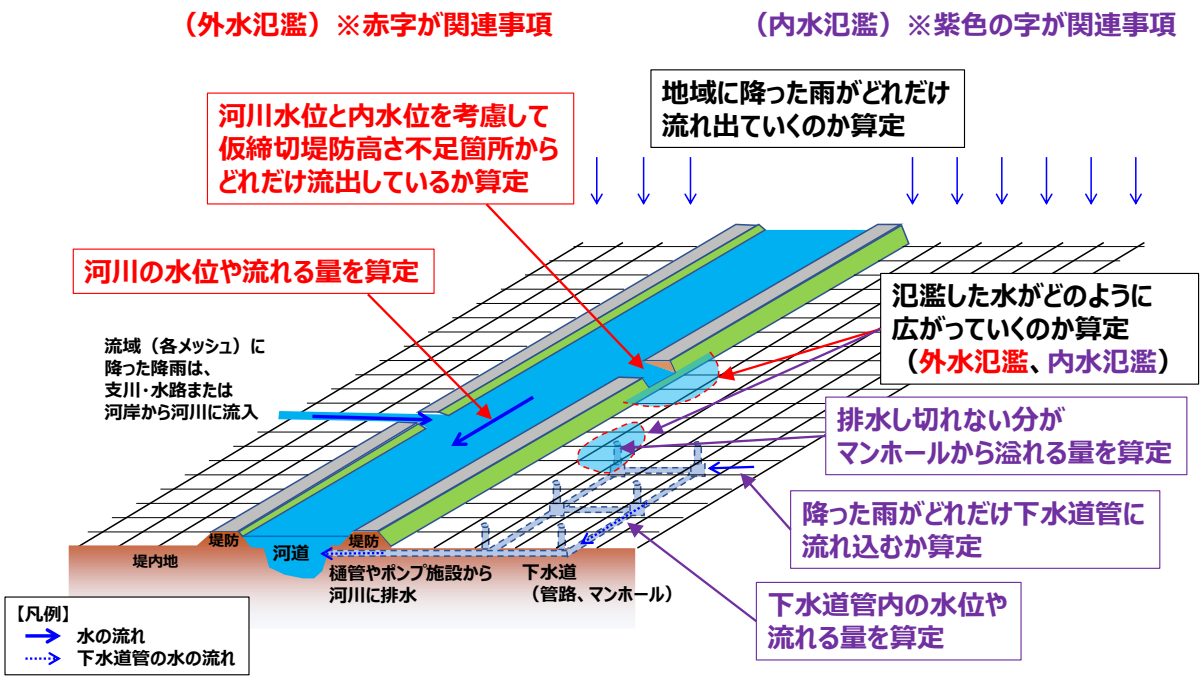
⑥　氾濫モデル

地盤高、粗度係数、建物占有率等は国土数値情報や基盤地図情報などの最新データにより設置

なお、地盤高（地形）データは 25m メッシュ化した。

シミュレーションモデルのイメージ

■ **仮締切堤防高さ不足区間は低平な市街地であるため、**
その影響の評価にあたっては、河川氾濫モデルに内水氾濫モデルを組み込む。



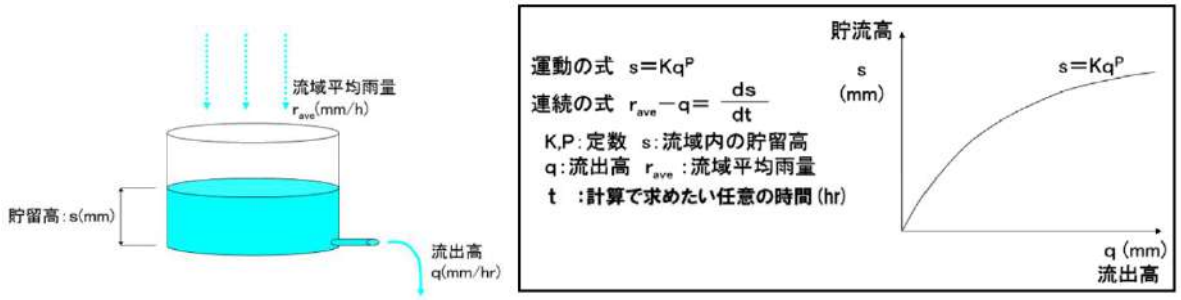
4.3. シミュレーションモデルの基礎式等

(1) モデルの基礎式（河道・氾濫原）

1) 貯留関数法

a) 流域の貯留関数

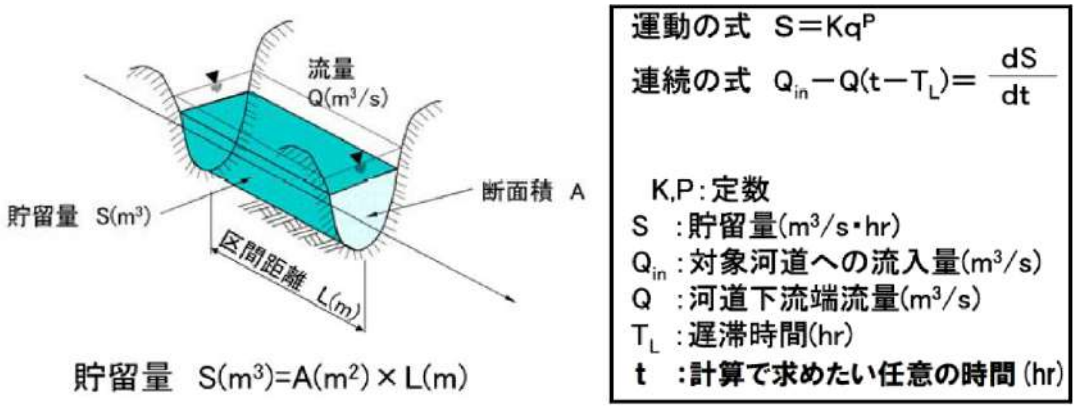
流域に降った雨が川に出てくるまでの流量を算出する計算方法で、流域を下図のようなタンクに見立てた場合、以下のような運動の式と連続の式で表すことができる。



b) 河道の貯留関数

川に出てきた水が集まり、洪水となって下流に流れていく流量を算出する計算方法で、ある河道区間を想定した場合、河道を流れる流量Q(m³/s)とその時に河道に貯留されている量S(m³)には一定の関係がある。

このSとQの関係を求め、以下の運動の式と連続の式から河道下流端の流量を算出する。



2) 河道の洪水の追跡法

河道の洪水追跡の数学モデルの基礎式として、以下の一次元解析法を適用した。

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q \quad \cdots\cdots (4.3.1)$$

$$\frac{\beta}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+\lambda\cos\theta\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\alpha v}{g}\frac{\partial v}{\partial x}=s_o-s_f \quad \cdots\cdots (4.3.2)$$

ここに、

A：流水断面積　　h：水深

Q：流量　　q：横流入量（x方向の単位長さあたり）

v：断面平均流速　　g：重力加速度

s_o：水路勾配　　s_f：摩擦勾配

α, β：流速分布形による補正係数

λ：圧力補正係数

θ：河床勾配

3） 平面 2 次元不定流による計算方法

浸水域内に建物が存在する場合の、平面 2 次元不定流のメッシュによる数値解法を用いた基礎式を以下に記載した。

$$\gamma\frac{\partial Q_x}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\frac{Q_x^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\gamma\frac{Q_xQ_y}{h}\right)+g\gamma h\frac{\partial(h+z_b)}{\partial x}+g\gamma n^2\frac{Q_x\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{h^{7/3}}+\frac{1}{2}C_D(1-\gamma)\frac{Q_x\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{h}=0 \quad \cdots\cdots (4.3.3)$$

$$\gamma\frac{\partial Q_y}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\frac{Q_xQ_y}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\gamma\frac{Q_y^2}{h}\right)+g\gamma h\frac{\partial(h+z_b)}{\partial y}+g\gamma n^2\frac{Q_y\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{h^{7/3}}+\frac{1}{2}C_D(1-\gamma)\frac{Q_y\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{h^{7/3}}=0 \quad \cdots\cdots (4.3.4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(\gamma Q_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\gamma Q_y)}{\partial y}=q \quad \cdots\cdots (4.3.5)$$

ここに、

Q_x, Q_y：x,y 方向の単位幅流量

h　：水深

z_b　：地盤高

γ　：空隙率（空隙の密度分布）

q　：降雨、下水道からの氾濫や地下浸透等

n　：土地利用に応じた粗度係数

C_D　：抗力係数

(2) 下水道管渠のモデル化

八千代地区・大芝地区については下水道網をモデル化し、下水道からの溢水氾濫も再現可能な詳細なモデル化を行う。

下水道は、管路の流れを解析するため、プライスマン・スロットモデルを採用した。これは、管路の頂部に仮想のスロットを設けることにより、開水路流～満管流を一連の一次元不定流解析が可能となる（図 4-1 参照）。

なお、下水道管路の諸元等の設定には、茂原市から提供いただいた下水道図面や施設台帳等をもとに下水道データ（管渠のサイズやマンホール位置・諸元）を作成した。

下水道モデルにより、下水道管渠内の流量・水位を時系列的に算出し、下水道モデルと氾濫域モデルを接続せることにより、マンホールから溢れる量を氾濫域モデルに受け渡し、氾濫域モデルにより、浸水域や浸水深を算出する仕組みとした（図 4-2 参照）。

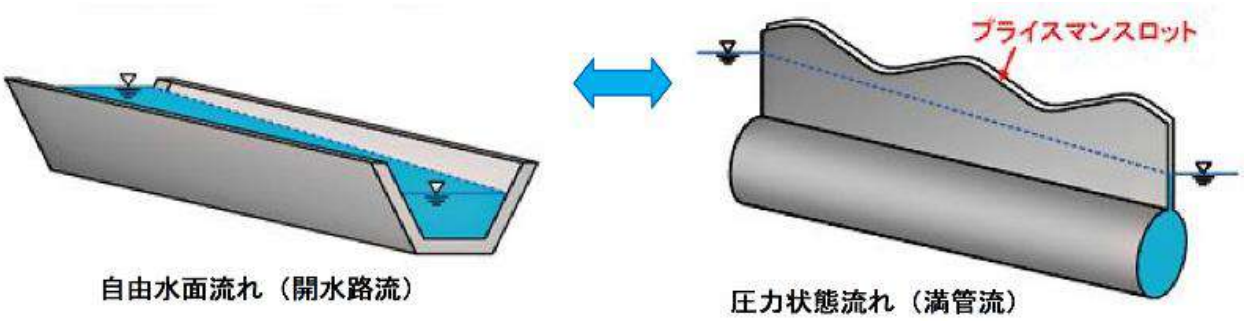


図 4-1 プライスマン・スロットモデルのイメージ

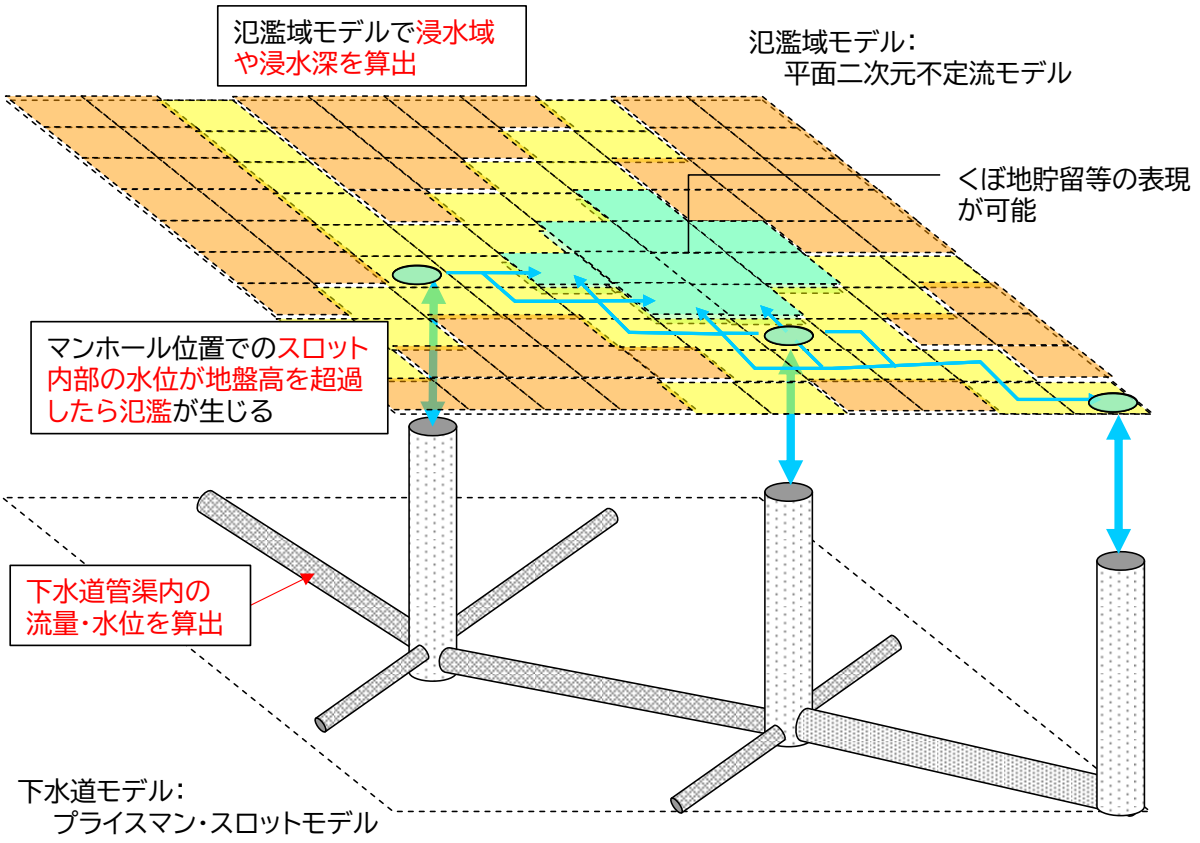


図 4-2 下水道と氾濫域の接続方法

4.4. シミュレーションモデルの構築

4.4.1. 流域分割

一宮川の流出検討における流域分割は、河川流域の状況をふまえ、基準地点および主要地点、支川合流点、治水施設地点等で行うこととした。この結果、流域は 47 流域に分割し、支川河道に対して、既往の浸水実績等を考慮し 14 河道に分割した。

表 4-1 流域面積一覧表

河　川		流域面積	備　考
一宮川	三途川合流点	37.72	基準点 金田地点流域面積 CA=184.99km^2 主要地点 早野地点流域面積 CA=67.38km^2
	豊田川合流点	67.38	
	阿久川合流点	92.60	
	鶴枝川合流点	108.10	
	瑞沢川合流点	184.99	
	河　　口	203.44	
豊田川		21.08	
阿久川		22.48	
鶴枝川		12.48	
瑞沢川		70.51	

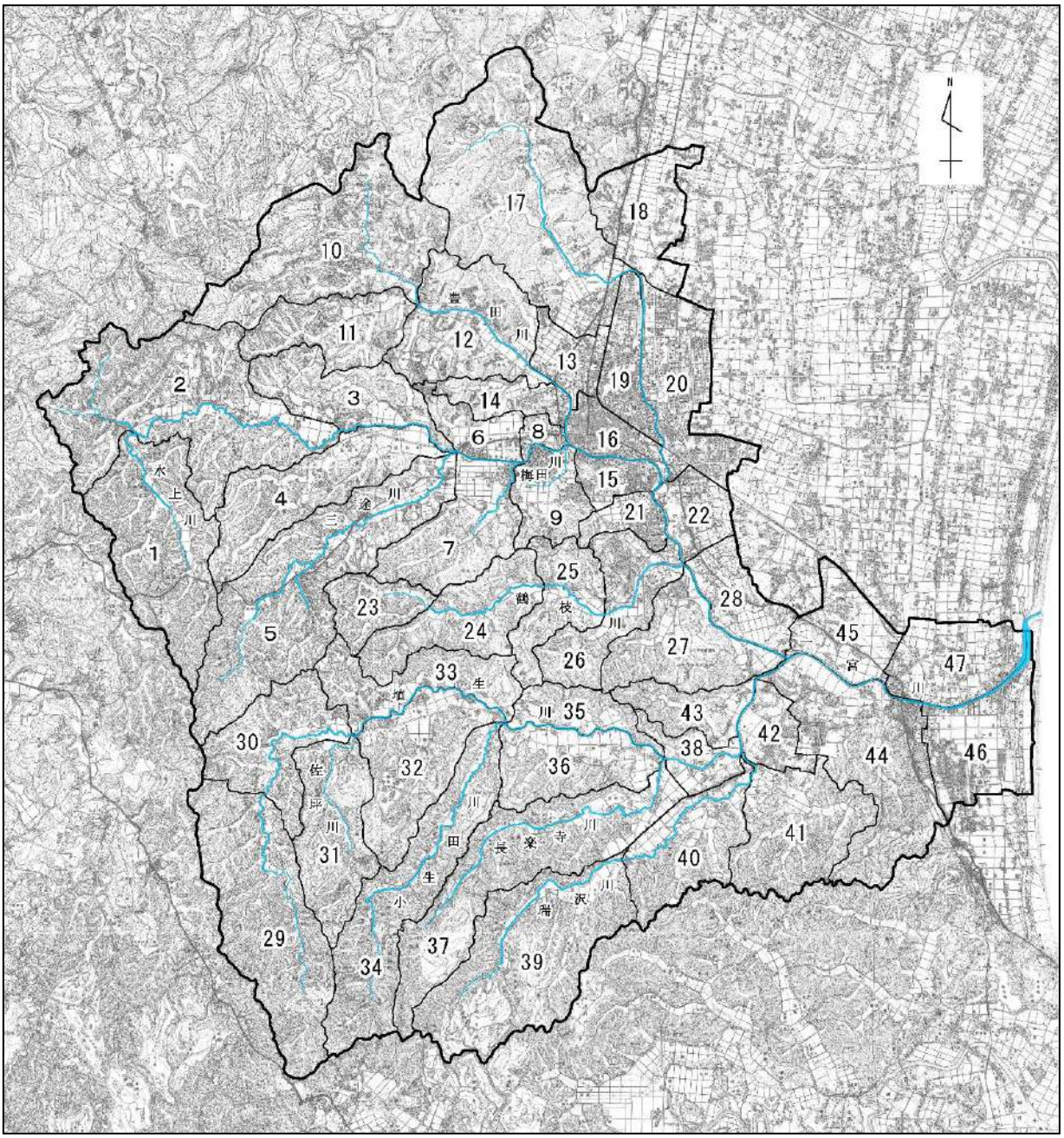


図 4-3 流域分割図

4.4.2. 流出モデル

流出計算モデルは、一宮川流域の区分流域数 47 流域を基に、支川の河道定数の設定区間として 14 河道を考慮して流出計算系統図を作成した。

ここで作成した流出計算モデル図は次頁に示すとおりである。

河道の不定流計算区間として、一宮川、水上川、本台川、三途川、豊田川、阿久川をモデル化し、調節池、河道貯留の非定常現象を再現した。

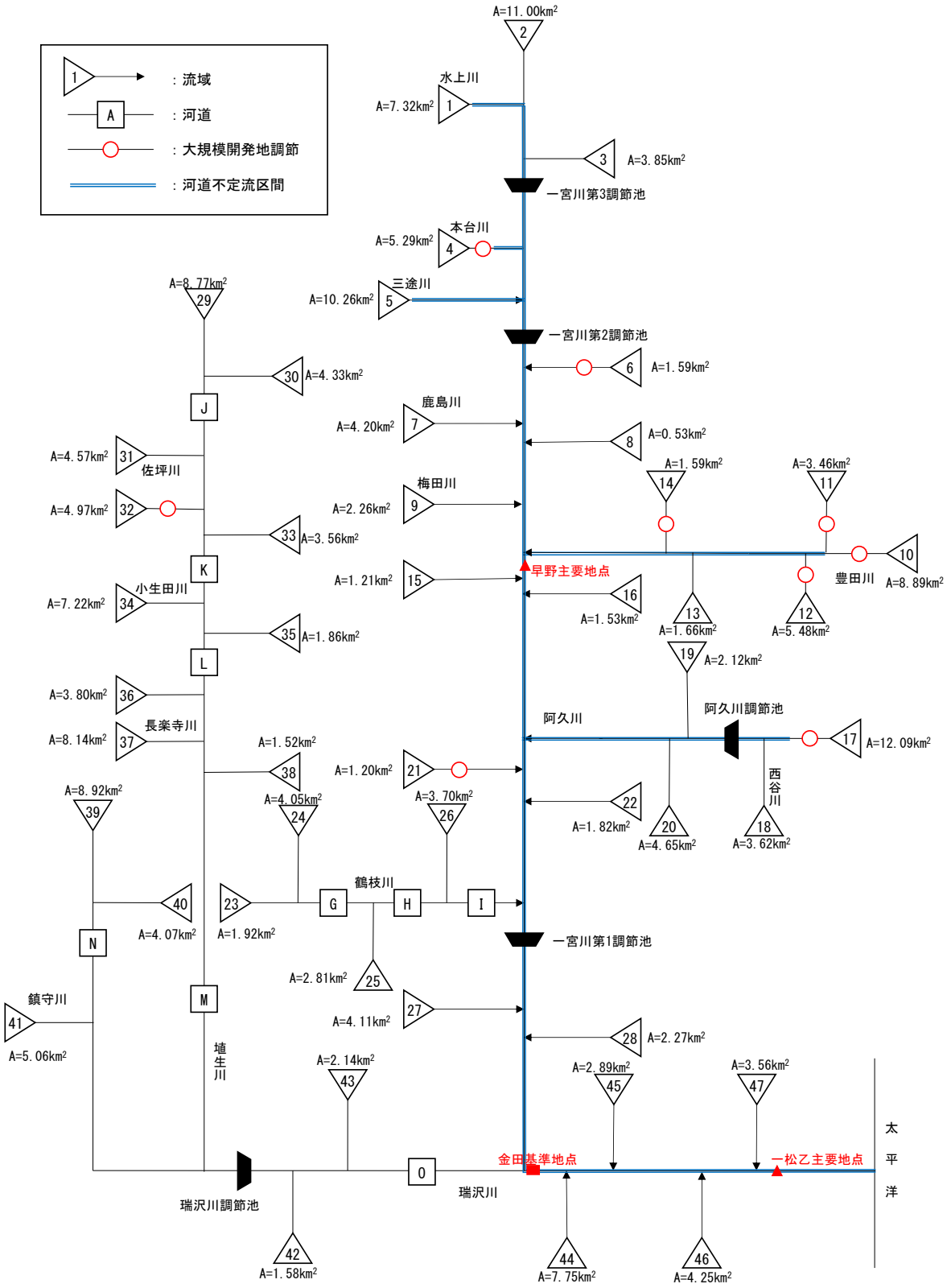


図 4-4 流出系統モデル図

4.4.3. 氾濫原モデル

氾濫解析モデルにおける氾濫モデルは、表 4-2 に示すデータを用いてデータセットを作成した。使用した氾濫原メッシュを図 4-5 に示し、平均地盤高を図 4-6 に示し、粗度係数分布図を図 4-7 に示す。

■氾濫原メッシュサイズ

・25m×25m

■メッシュ数

・東西方向：800 メッシュ

・南北方向：840 メッシュ

表 4-2 使用データ

設定項目	使用データ （用途）	出典	データ仕様
平均地盤高	基盤地図情報 数値標高モデル 5mDEM	国土地理院	ポイント
粗度係数	高解像度土地利用土地被覆図	宇宙航空研究開発機構 (JAXA)	ポリゴン
空隙率・透過率	基盤地図情報 建築物の外周線	国土地理院	ポリゴン

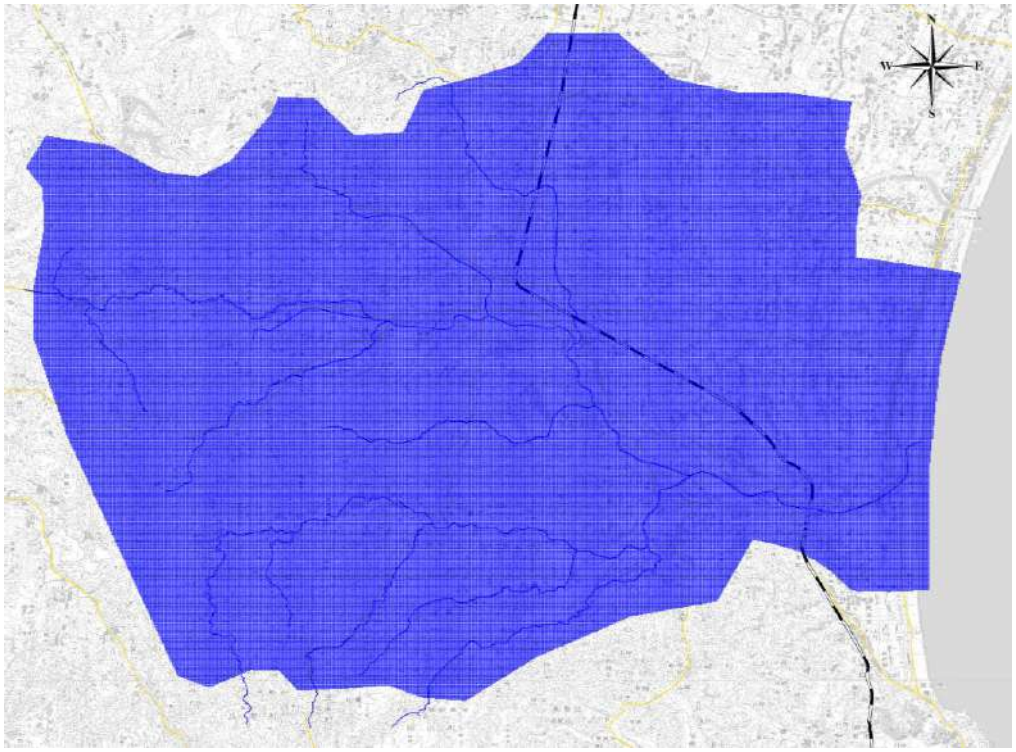


図 4-5 氾濫原メッシュ図

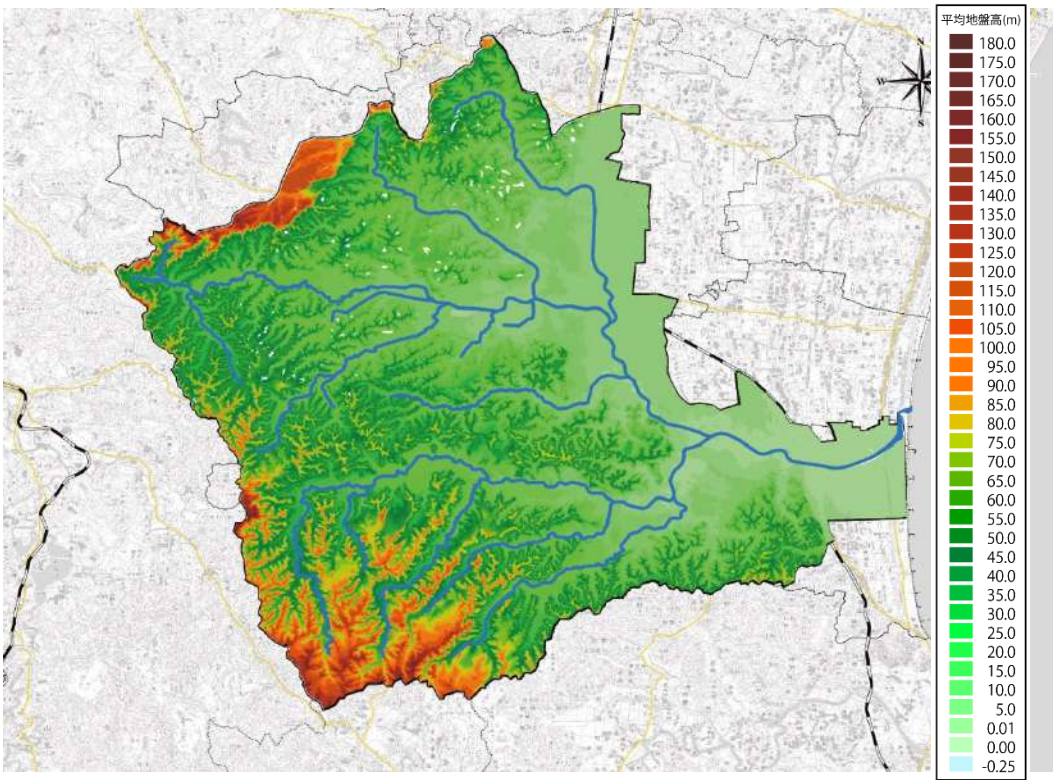


図 4-6 氾濫原の地盤高コンター図

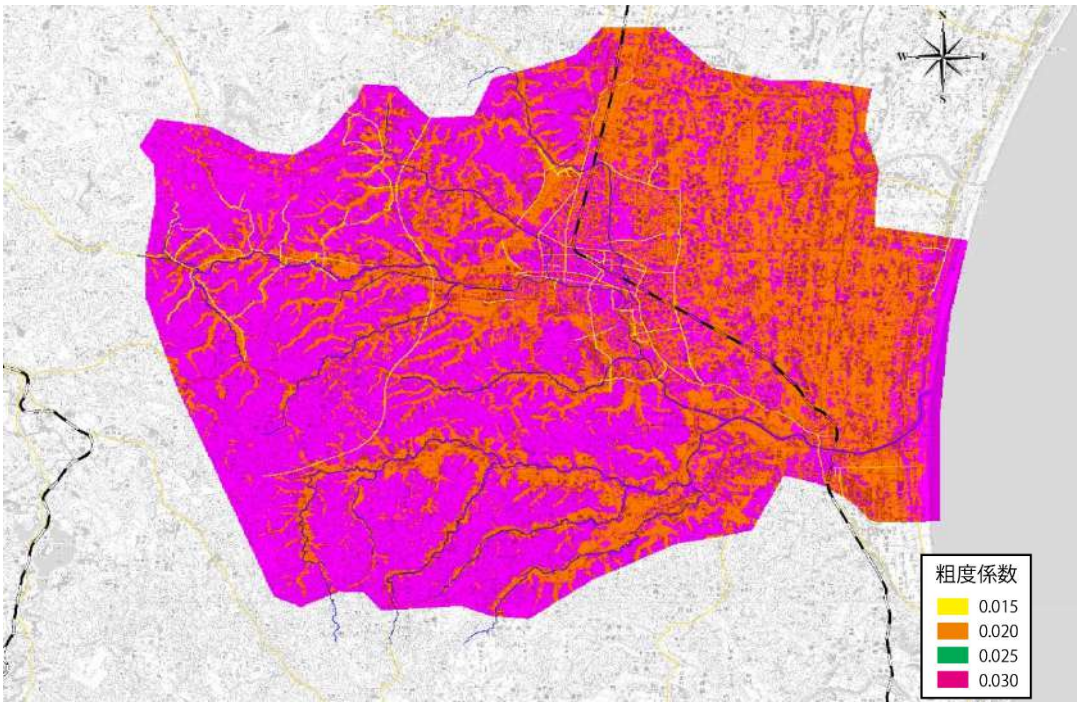


図 4-7 氾濫原の粗度係数分布図

氾濫原の空隙率・透過率について、洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）に従って、以下のように建物占有率から算定し設定した。空隙率・透過率の分布を図 4-8 に示す。

$$\gamma_v = 1 - (S1 + S2 + S3)/(DX \times DY) \quad (3.7)$$

$$\gamma_x = \gamma_y = \gamma_v \quad (3.8)$$

$$\gamma_x = 1 - B_y / DY, \quad \gamma_y = 1 - B_x / DX \quad (3.9)$$

$$\gamma_x = \gamma_y = 1 - \sqrt{1 - \gamma_v} \quad (3.10)$$

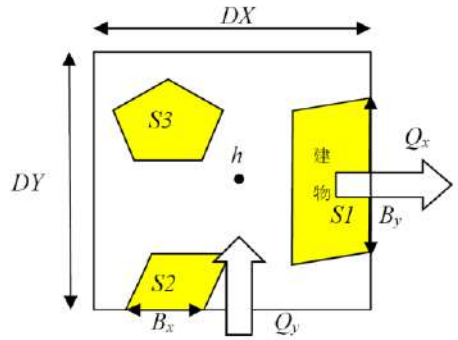


図-3.2-1　メッシュ内の建物と空隙率・透過率の設定

出典; 洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）

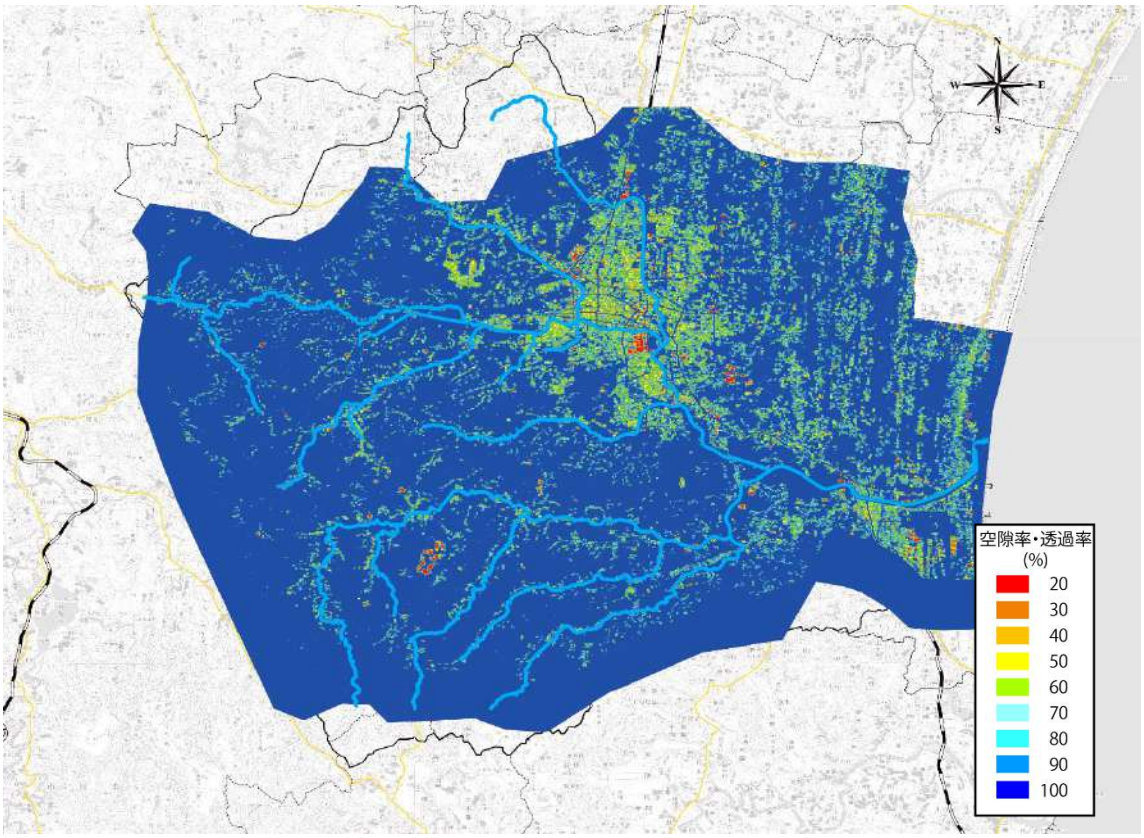


図 4-8 空隙率・透過率の分布図

氾濫解析において、氾濫流の伝播に影響を与えるメッシュ幅に対して盛土幅が小さく地盤高で十分表現できない盛土構造物（主要道路、鉄道、堤防）やカルバートは、浸水現象をより適切に表現するため、不透過境界、超える場合は越流が生じるものとしてモデル化する。連続盛土、カルバートの位置図を図 4-9 に示す。

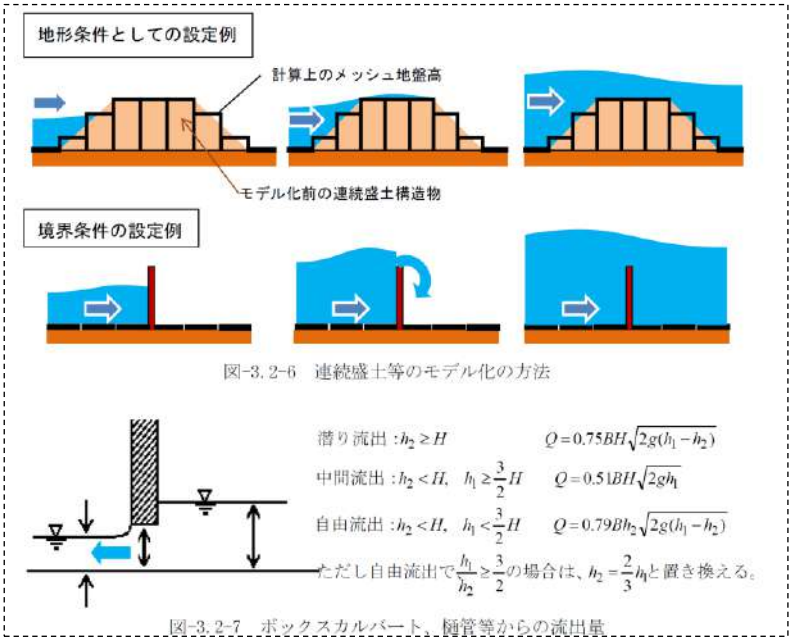


図-3.2-6　連続盛土等のモデル化の方法

図-3.2-7　ボックスカルバート、樋管等からの流出量

出典；洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）

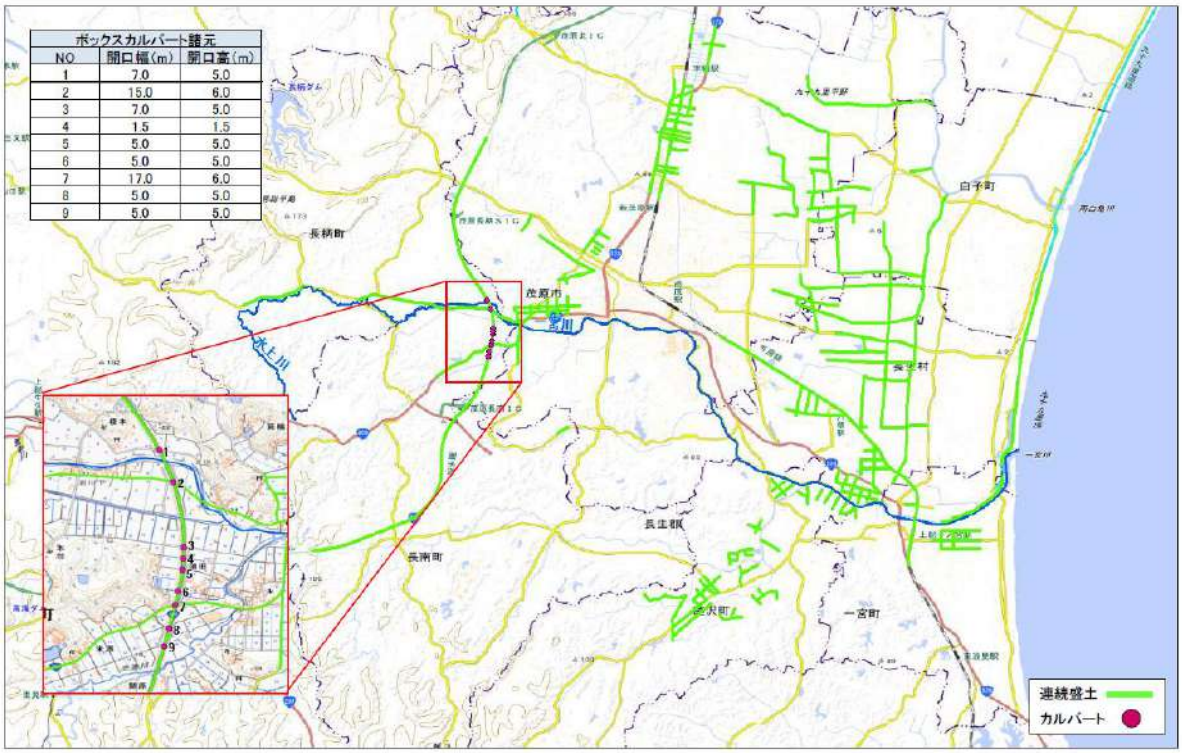
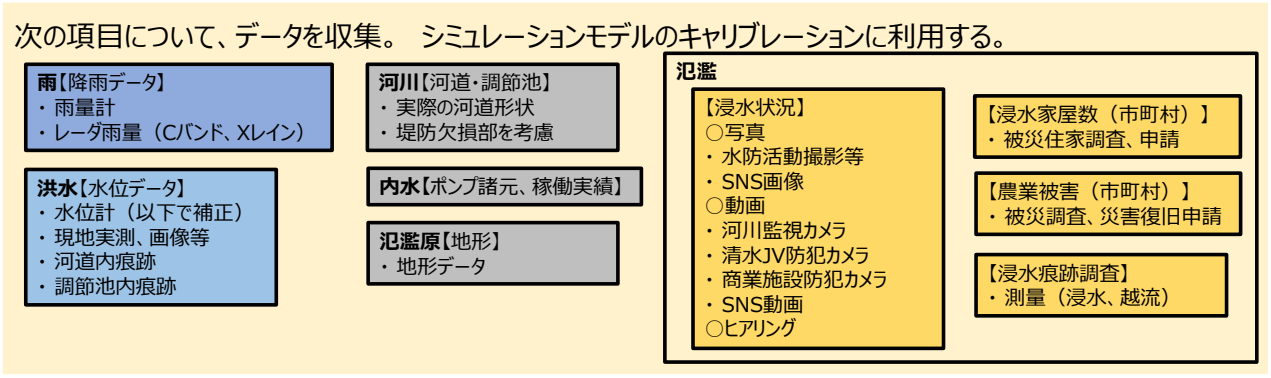


図 4-9 連続盛土およびカルバート位置図

4.5. 浸水に関する情報収集

モデルの再現性を向上（キャリブレーションに利用）させるために、浸水に関する情報収集を行った。

収集した情報の項目は次のとおりである。