

参考資料2

浸水シミュレーションに関する補足説明資料

令和2年9月

東京都狛江市

資料目次

1. 浸水シミュレーションの概要	1
2. 要素モデルの選定.....	4
3. シミュレーションモデルの作成.....	13
4. キャリブレーション	14

1. 浸水シミュレーションの概要

浸水シミュレーションは、以下の要素モデルを組み合わせて構築するモデルである。

- (1) 降雨損失モデル
- (2) 表面流出モデル
- (3) 管内水理モデル
- (4) 氾濫解析モデル

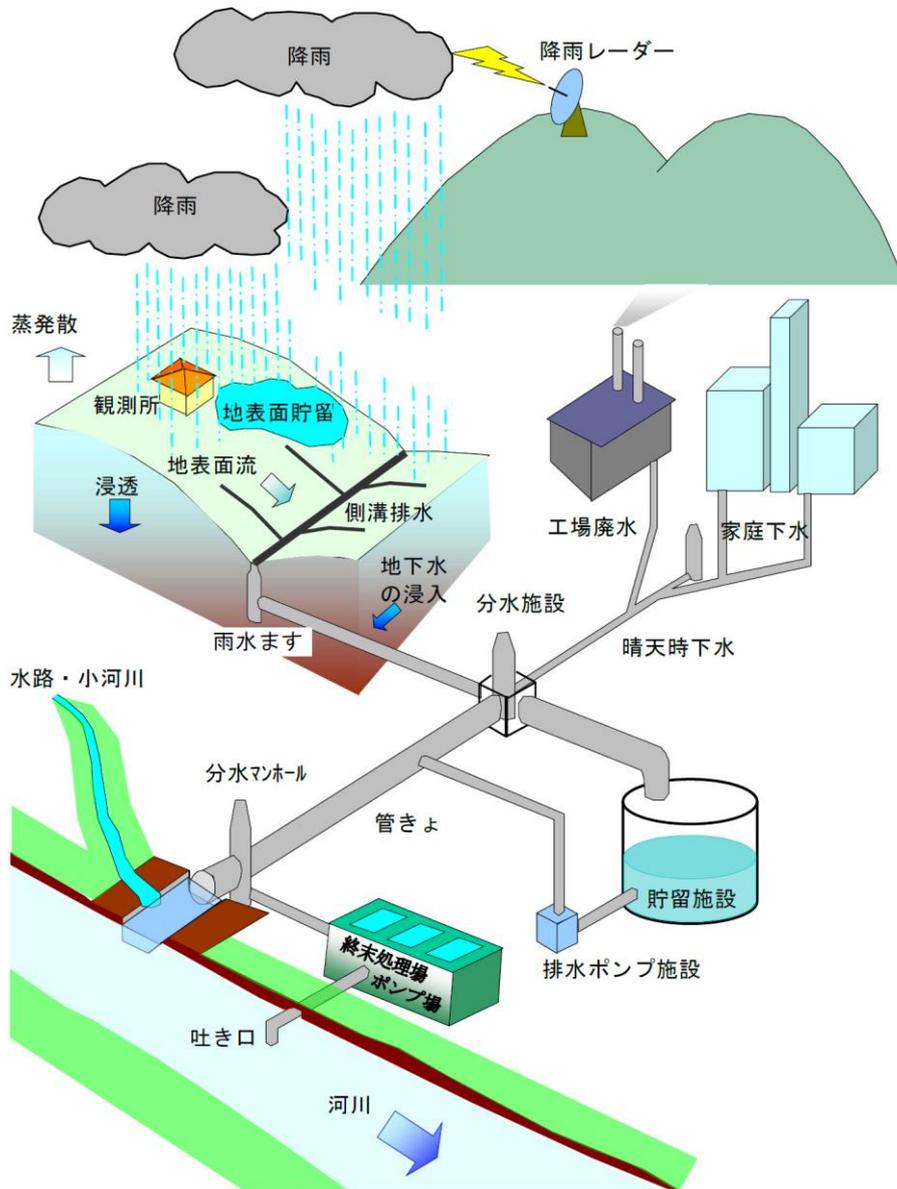


図 1-1 流出機構の概念図

出典：「流出解析モデル利活用マニュアルー2017年3月ー
財団法人 下水道新技術推進機構」

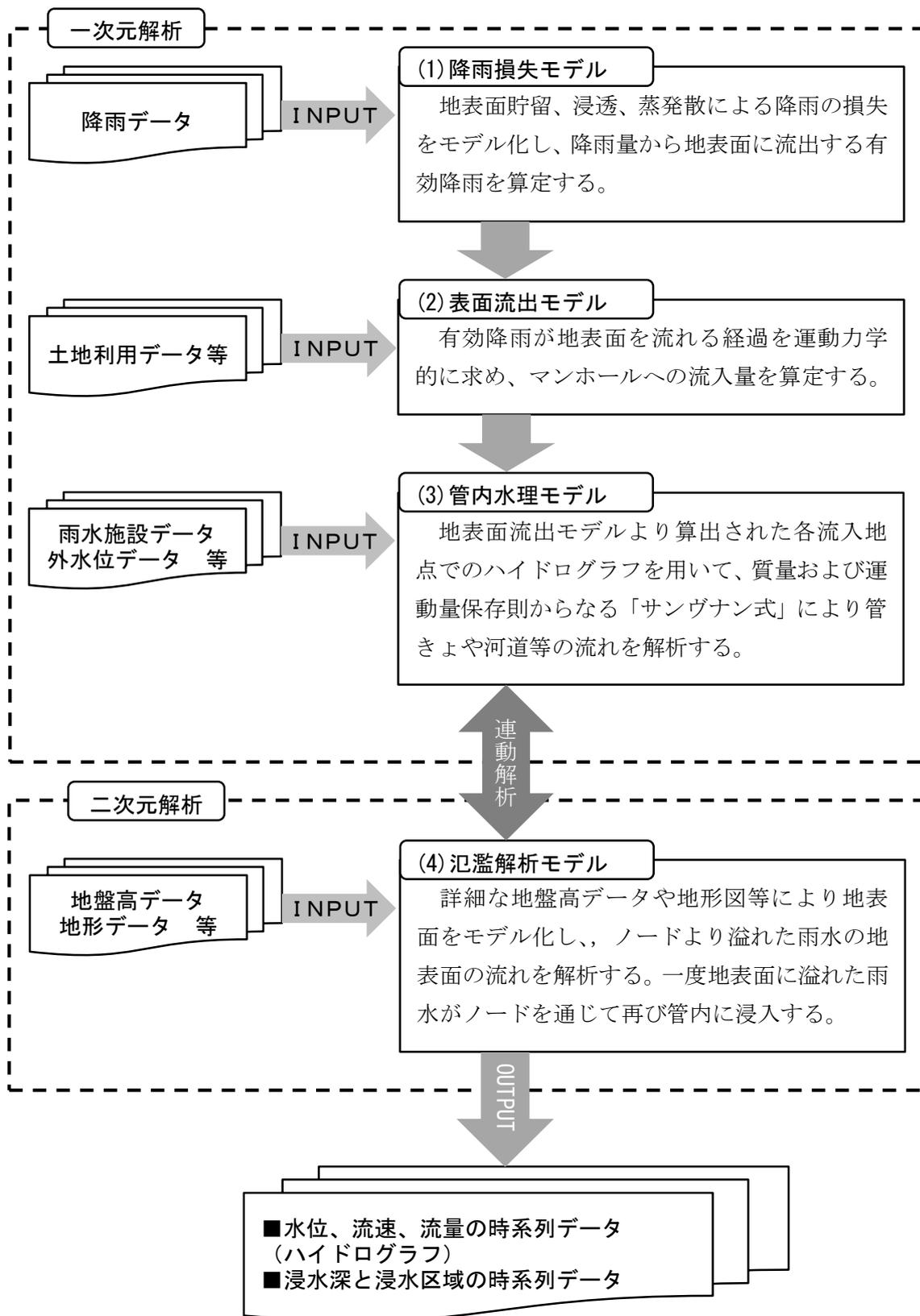


図 1-2 流出解析モデルの構成と解析フロー

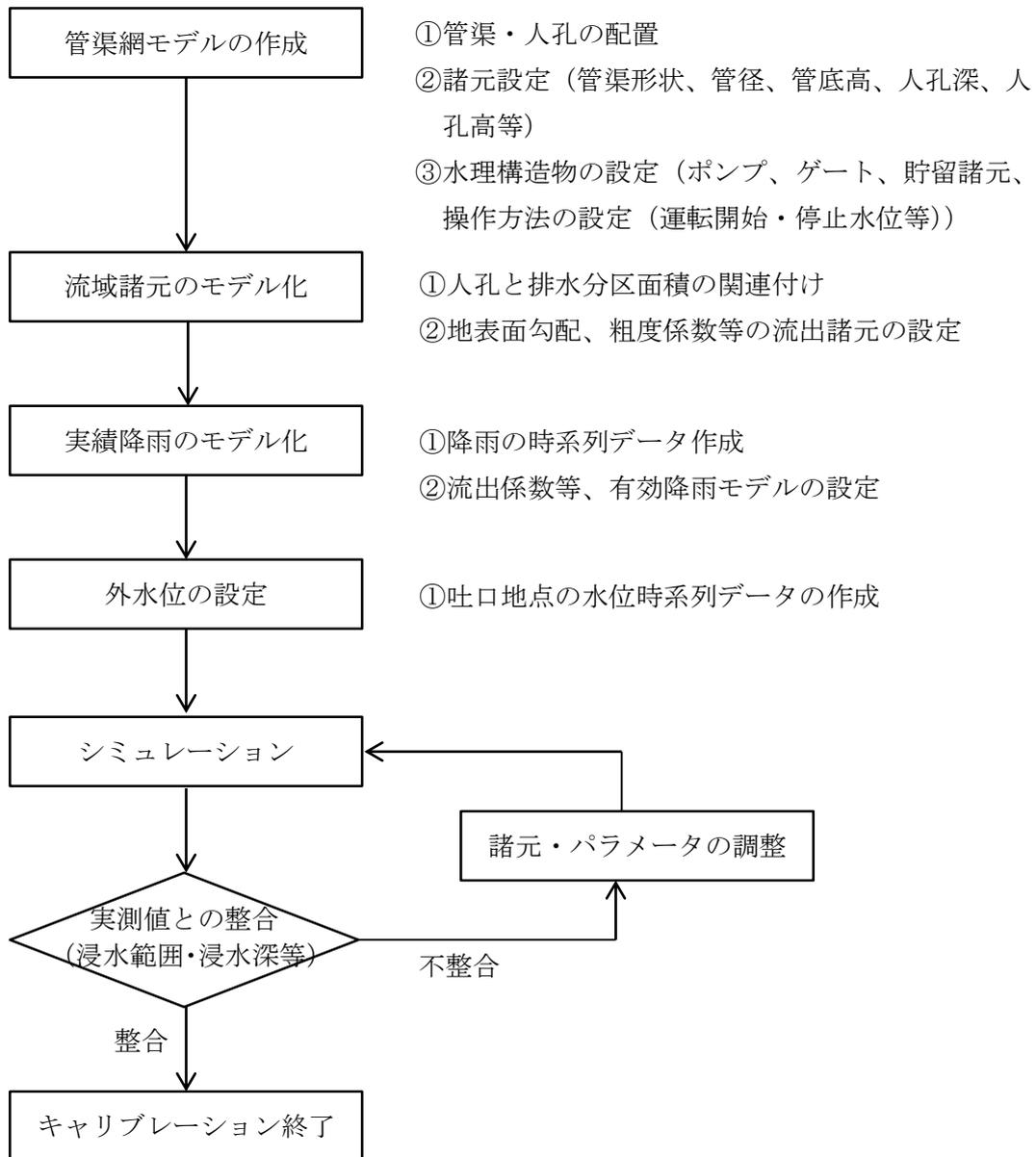


図 1-3 モデル化およびキャリブレーションの検討フロー

2. 要素モデルの選定

浸水シミュレーションに使用するソフトは「流出解析モデル利活用マニュアル 2017年3月 公益財団法人 日本下水道新技術機構」(以下(利活マニュアル)という)に示された3つの流出解析モデルのうち「Infoworks ICM」を用いるものとする。なお、各流出解析モデルは、それぞれ以下の特徴を有しているが、基本的な解析機能、入力項目、出力結果は、概ね同等である。

表 2-1 流出解析モデルの機能概要

		InfoWorks ICM	今回採用
基本機能	1. 降雨損失モデル	ホートンモデル	
		流出係数モデル	○
	2. 表面流出モデル	二重線形貯留法	○
		非線形貯留法	
	3. 管内水理モデル	完全サンヴナン方程式	○
	4. 氾濫解析モデル	二次元不定流モデル	○

(1) 降雨損失モデル

降雨損失モデルは、ホートンモデルと流出係数モデルがあり、以下の特徴がある。

1) ホートンモデル

ホートンモデルは、土壌の浸透能を超えた雨水が流出する考え方にに基づき、降雨のうち雨水排水施設へ流出せず、地表面から土壌に浸透する雨水量の時間変化を求めるモデルであり、次式で表現される。

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで、 f : 浸透能 (mm/hr)
 f_0 : 初期浸透能 (mm/hr)
 f_c : 最終浸透能 (mm/hr)
 k : 減衰係数 (s⁻¹)
 t : 時間 (s)

2) 流出係数モデル

流出係数モデルは、降雨損失モデルの各損失を到達時間当たりの流出係数として表すもので、都市流域の雨水流出量の計算に用いられることが多く、有効降雨量は、降雨量×流出係数により表される。

狛江市の公共下水道事業計画(平成9年3月)において、将来の土地利用を考慮した流出係数として、狛江東部第1、調布第8処理分区および狛江南部処理分区とも流出係数0.55と設定している。

本検討対象である根川雨水幹線は、調布第8処理分区に該当し、多摩川幹線流域は狛江南

部処理分区に該当する。

また、根川排水区について現況の雨水流出係数を算定した結果、0.525 となり、現在の計画値と整合していることから、計画流出係数は妥当なものと判断し、流出係数として0.55を採用する。

表 2-2 事業計画による流出係数

排水区名	幹線名	流出係数	備考
根川排水区	根川雨水幹線	0.55	事業計画より
狛江南部第2排水区	多摩川幹線	0.55	事業計画より

(2) 表面流出モデル

表面流出モデルは、時間面積法（タイムエリア法）、非線形貯留法、または二重線形貯留法があるが、Infoworks ICM では、非線形貯留法または二重線形貯留法が適用可能である。

本モデルでは、流域と管渠配置の関係から設定が容易な非線形貯留法を採用する。

各モデルの概要を以下に示す。

1) タイムエリア法

タイムエリア法は、流達時間を基本にノードが受け持つ区域を等到達時間域に分割し、各等到達時間域での有効降雨による流出ハイドログラフを求め、これを単位図の手法により重ね合わせたものをノードに流入するハイドログラフとする方法である。

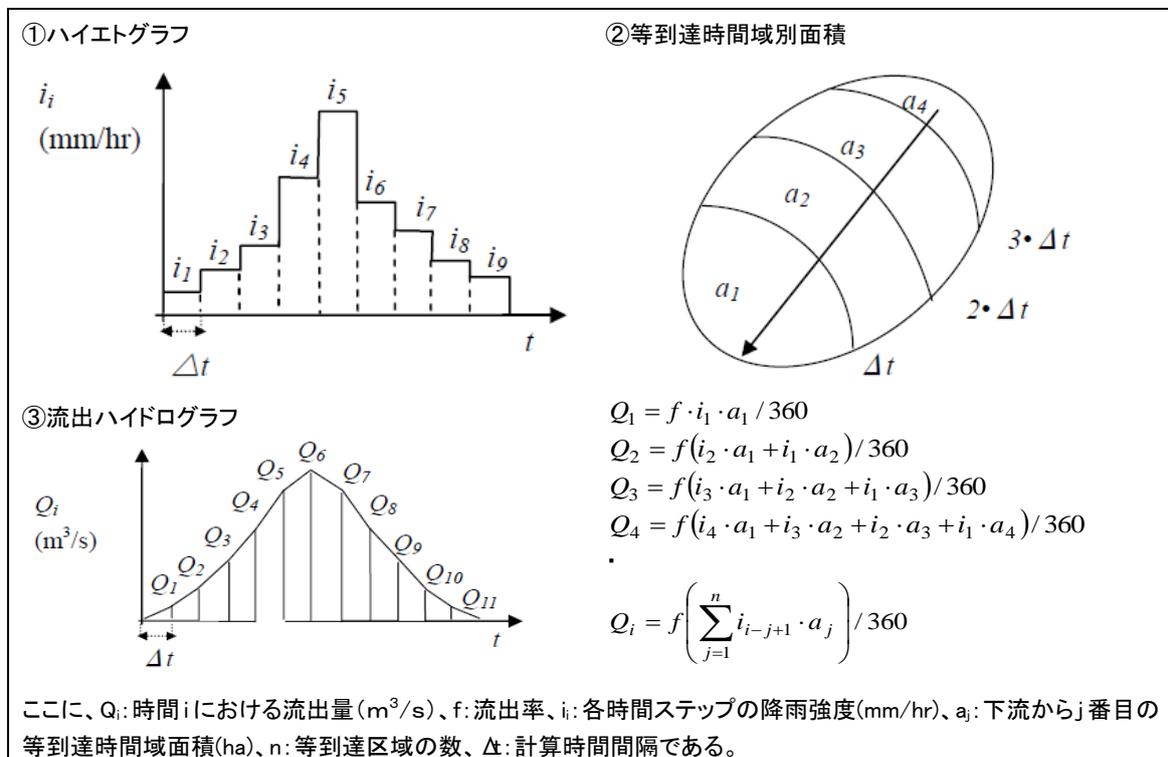


図 2-1 タイムエリア法

2) 非線形貯留法

非線形貯留法は、貯留量 S と流出量 Q との関係式を、式 (2-2-1) に示す非線型方程式で与え、式 (2-2-1) と式 (2-2-2) に示す連続の式を組み合わせた方法であり、どのタイムステップにおいても、水深と流量を数値的に解くことが可能である。この方法では、地表水は広い範囲にわたって大変薄い層として概念化されている。

3モデルとも選択可能で、主に、xpswmm で使用される。

$$S = kQ^m \dots\dots\dots (2-2-1)$$

ここで、 S : 貯留量 (m^3)
 Q : 流出量 (m^3/s)
 k, m : 定数

$$\frac{dS}{dt} = r_e - q \dots\dots\dots (2-2-2)$$

ここで、 r_e : 有効雨量強度 (mm/hr)
 q : 直接流出高 (mm/hr)

3) 二重線形貯留法

地表面貯留を表現するタンクと、降雨と流出のピークの差を表現するタンクの2つの線形貯留タンクを組み合わせたモデルである。貯留式は、式 (2-3-1) のとおりであり、この貯留式を2段でもちいて連続の式と組み合わせる。

$$S = kQ \dots\dots\dots (2-3-1)$$

ここで、 S : 貯留量 (m^3)
 Q : 流出量 (m^3/s)
 k : 定数

なお、 k を与える式はモデルによって異なるが、一例として、タンクを直列に組み合わせた流出解析モデルの関係式を、式 (2-3-2)、式 (2-3-3) 示す。

この例では、 k は降雨強度、排水面積、地表勾配により変化し、次式で表される。

$$k = C \times i^{-0.39} \dots\dots\dots (2-3-2)$$

$$i = 0.5 \times (1 + i_{10}) \dots\dots\dots (2-3-3)$$

ここで、 C : 定数
 i_{10} : 10分間平均降雨強度 ($mm/10min$)

また、定数 C は地表勾配と排水面積の関数であり、式 (2-3-4) で表される。

$$C = 0.117 \times s^{-0.13} \times A^{0.24} \dots\dots\dots (2-3-4)$$

ここで、 s :地表勾配 ただし、 $s < 0.002$

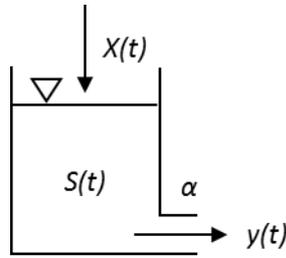
A :排水面積 (m^2) ただし、 $1,000 < A < 10,000$

なお、式 (4-1-3) について2つの直列タンクを微分方程式で表すと式 (2-3-5) に示すとおりとなる。

$$k^2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + 2k \frac{dQ}{dt} + Q = i_n \dots\dots\dots (2-3-5)$$

ここで、 i_n :有効雨量 (=降雨量-降雨損失) (mm)

〈参 考〉「二重線形貯留法」式 (2-3-5) の導き方に関する補足説明
タンクモデルの基本式



$$\frac{d}{dt} S = x - y, \quad y = \alpha S$$

$$\frac{d}{dt} S + \alpha S = x$$

ここで、 $s = \frac{d}{dt}$ とすれば

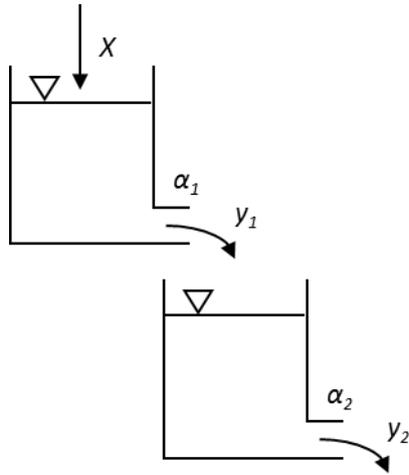
$$S(s + \alpha) = x$$

$$S(t) = \frac{1}{s + \alpha} x(t)$$

$$y(t) = \alpha S(t) \quad S(t) = \frac{1}{\alpha} y(t)$$

$$y(t) = \frac{\alpha}{s + \alpha} x(t)$$

2つの直列タンクの場合



$$\begin{cases} y_1 = \frac{\alpha_1}{s + \alpha_1} x \\ y_2 = \frac{\alpha_2}{s + \alpha_2} y_1 \end{cases}$$

これから y_1 を消去すれば

$$y_2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(s + \alpha_1)(s + \alpha_2)} x$$

$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ であれば、

$$y_2 = \frac{\alpha^2}{(s + \alpha)^2} x$$

$$(s + \alpha)^2 y_2 = \alpha^2 x$$

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} + 2\alpha \frac{d}{dt} + \alpha^2 \right) y_2 = \alpha^2 x$$

$$\therefore \frac{d^2 y_2}{dt^2} + 2\alpha \frac{dy_2}{dt} + \alpha^2 y_2 = \alpha^2 x$$

$$\left(\frac{1}{\alpha^2} \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \frac{2}{\alpha} \frac{dy_2}{dt} + y_2 = x \right)$$

前述の場合であれば

$$y_2 = Q$$

$$\alpha = \frac{1}{k}$$

であるから、代入すると

$$k^2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + 2k \frac{dQ}{dt} + Q = i_n$$

(3) 管内水理モデル

管路は、図 2-2 に示すように、雨水等の流入点であるマンホールと、流水現象の起こる管きよとの組み合わせとしてモデル化を行い、合流、分水、越流（堰）、ポンプ等による流れの変化は、マンホールのみにおいて生じるものとし、管きよにおける流入量（上流）と流出量（下流）の差はマンホールでの貯留量の変化として表現される。管内の流れは、質量保存則、運動量保存則、およびエネルギー保存則に従い、質量保存則からは連続式が導かれ、ニュートンの第2法則 ($F=ma$ 、ここで、 F : 応力、 m : 質量、 a : 加速度) からは、運動方程式が得られる。また、管内の流れは、数学的に一对の双曲線型の一次微分方程式によって一次元的に表現されるため、最終的に連続式は式 (2-4-1)、運動方程式は式 (2-4-2) のように導かれる。この2式は、一次元流れの基本式であり、サンヴナン方程式と呼ばれる。

完全サンヴナン方程式を採用する。

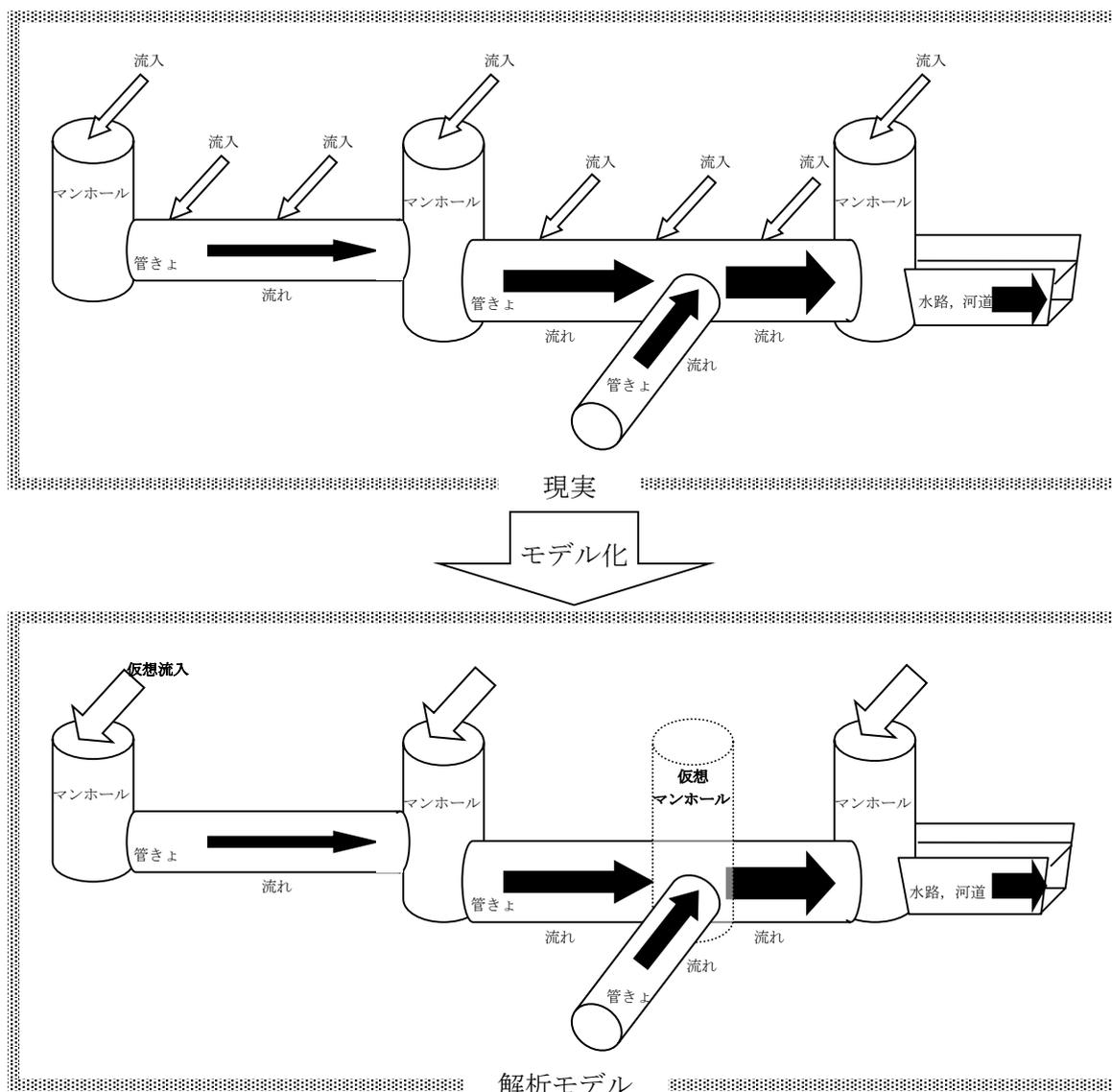


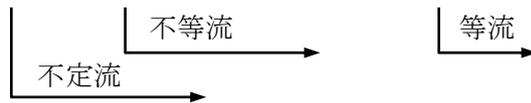
図 2-2 管路のモデル化概念図

・連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2-4-1)$$

・運動方程式

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} - (S_0 - S_f) = 0 \dots\dots\dots (2-4-2)$$



- ここで、 Q : 流量 (m³/s)
 t : 時間 (s)
 x : 管の長さ方向の距離 (m)
 A : x に垂直な流れの断面積 (m²)
 θ : 下水管と水平面のなす角
 S_0 : 管のこう配 ($\sin \theta$)
 S_f : 摩擦こう配
 g : 重力加速度 (m/s²)
 h : 水位 (m)

(4) 氾濫解析モデル

流出解析モデルでは、施設能力が不足する箇所での溢水現象を表現するが、地盤高に高低差がある場合の実現象は、溢水した雨水が道路等の地表面を流れて低地部に流集する。そのため、都市域における浸水想定区域図やハザードマップ作成等、内水氾濫解析を行う場合には、これら地盤高の高低差による氾濫流れを考慮した氾濫シミュレーションが有効であり、その計算結果として、浸水の範囲や浸水深等が求められる。

また、地表面に氾濫した雨水の解析は、氾濫解析モデルを用いる方法と、管内水理モデル（一次元解析モデル）を応用して解析する方法が考えられる。通常は、氾濫解析モデルの適用が一般的であるが、排水区域が小さく道路密度が高い都市部においては、一次元解析モデルを応用した方法でも高い精度が得られる。表 2-3 に代表的な氾濫解析手法を示す。

本検討では、二次元不定流モデルを採用する。

表 2-3 氾濫解析解法の種類と概要

各 項 氾濫モデル		開水路非定常流式の項						長所および短所
		第1項	第2項	第3項	第4項	第5項	第6項	
一 次 元 解 析 モ デ ル	貯留関数法	×	×	△	×	○	○	長所：計算時間が短い。 短所：氾濫域が広い地形を有する地域には適用が難しい。
	Muskingum 法	×	×	△	△	○	○	
	簡易一次元 不定流モデル	×	×	×	○	○	○	
氾 濫 解 析 モ デ ル	越流ポンド モデル	×	△	△	○	○	△	長所：流量係数に慣性項の影響が含まれているので運動方程式が簡略化できる。 短所：緩勾配の氾濫原では適合性が落ちる。 長所：ポンドを不定形に分割できる。 短所：浸水深の横断的な変化の再現性が低い。 長所：氾濫流の運動を厳密に再現できる。 短所：計算時間が長い。
	氾濫ポンド (開水路ポ ンド)モデル	○	×	×	○	○	○	
	二次元不定流 モデル	○	○	○	○	○	○	

注1) 第1項：場の加速度，第2・3項：慣性項，第4・5項：水面勾配項，第6項：抵抗項
2) ○：考慮されている項，△：近似的に考慮されている項，×：考慮されていない項

内水浸水は、基本的には運動量を有する氾濫流が氾濫原を二次元的に流下し拡散していく現象である。したがって、氾濫解析では、浸水深と流速ベクトルを反映した流量フラックスを用いるため、基礎式（連続式と運動方程式）は移流項を含む平面二次元不定流方程式を標準とする。

基礎式（式（2-5-1）、式（2-5-2）、式（2-5-3））は、浅水域における高潮や津波の解析と同じ基本式であり、底面のせん断力や地形変化を設定することにより、高潮や津波の解析に使用することができる。

なお、底面せん断力は、底面摩擦力であり、マンニング則を適用している。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-5-1)$$

<運動方程式>

$$(\text{x方向}) \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{xb}}{\rho} \quad \dots\dots\dots (2-5-2)$$

$$(\text{y方向}) \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{yb}}{\rho} \quad \dots\dots\dots (2-5-3)$$

- ここで、 h : 水深
 t : 時間
 M : x 方向の流量フラックス ($M=uh$)
 N : y 方向の流量フラックス ($N=vh$)
 u : x 方向の流速
 v : y 方向の流速
 g : 重力加速度
 ρ : 水の密度

$$\tau_{xb} : x \text{ 方向の底面せん断力}$$

$$\tau_{xb} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (2-5-4)$$

$$\tau_{yb} : y \text{ 方向の底面せん断力}$$

$$\tau_{yb} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (2-5-5)$$

n : 汎濫原粗度係数基礎式

式 (2-5-4) および式 (2-5-5) を式 (2-5-2) および式 (2-5-3) に代入すると運動方程式は下記のとおり示される。

$$(x \text{ 方向}) \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (2-5-6)$$

$$(y \text{ 方向}) \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (2-5-7)$$

3. シミュレーションモデルの作成

シミュレーションモデルは、下記の資料をもとに作成した。

(1) 下水道管渠・マンホールのモデル化

下水道管渠・マンホールは、調布市ならびに狛江市の下水道台帳データを元に作成した。台帳で不明な箇所は、現地確認により補完した。

(2) 水理構造物のモデル化

ポンプ施設（排水量、稼働時間）、移動ポンプ（排水量、稼働時間）、樋管（敷高、幅、高さ、稼働時間）、各分水施設（堰高、堰長）を構造図・操作状況等の聞き取り結果をもとにモデル化した。

(3) 地表面のモデル化

国土地理院基盤地図情報 5mメッシュ標高の最新版を使用して地表面メッシュを作成。氾濫流の計算には、土地利用により粗度係数の標準値を設定。

(4) 境界条件の設定

1) 降雨量の設定

流域内の降雨観測記録をもとに、ティーセン分割により各観測所の降雨を適用する範囲を設定した。

ティーセン分割とは、当該雨量観測所と隣接する雨量観測所の距離を2等分してそれぞれの雨量観測所の影響範囲を分ける手法であり、降雨解析で一般に用いる手法である。

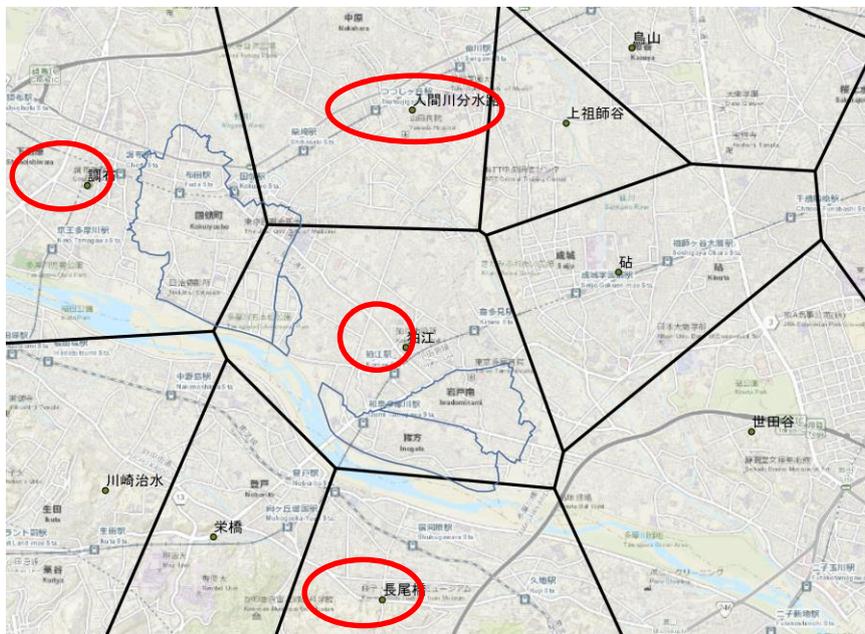


図 3-1 雨量観測所とティーセン分割

2) 多摩川水位（外水位）の設定

樋管地点での目視観測結果と痕跡水位（ピーク水位）および近傍水位観測所の観測記録をもとに波形を推定した。

4. キャリブレーション

キャリブレーションは、作成した流出解析モデルの再現性を高めるために、モデルのパラメータの調整を行って解析結果と実測データとの整合を図る作業である。

一般には、近傍の雨量ならびに管渠の水位・流量を測定し、得られた水位ハイドログラフ（水位の変化を時系列で並べた図）とシミュレーション結果のハイドログラフを比較することにより、波形を合わせていく作業となる。

今回の台風第19号時には、管渠内の観測が行われていないため、浸水の状況をもとに設定することとなる。

調整するパラメータとしては、流出係数、流域幅、流域勾配、管渠の粗度係数、地表面の粗度係数等がある。

（1）流出係数

土地利用状況により一般的な値を設定するが、学校や広い公園等がある場合は、部分的に変更する場合がある。

（2）流域幅の設定

流出解析モデルの中では、各管渠が受け持つ排水区の形状は矩形として捉えられ、管渠はこの矩形流域の中央に位置するものとする。このときの管渠へ流入するまでの延長は、流入時間に影響を与えるパラメータであり「斜面長」と呼ぶ。斜面長は流域面積に対する管渠延長の割合（管渠密度）に大きく影響され、 $[\text{斜面長} = \text{流域面積} / \text{流域幅}]$ と設定される。

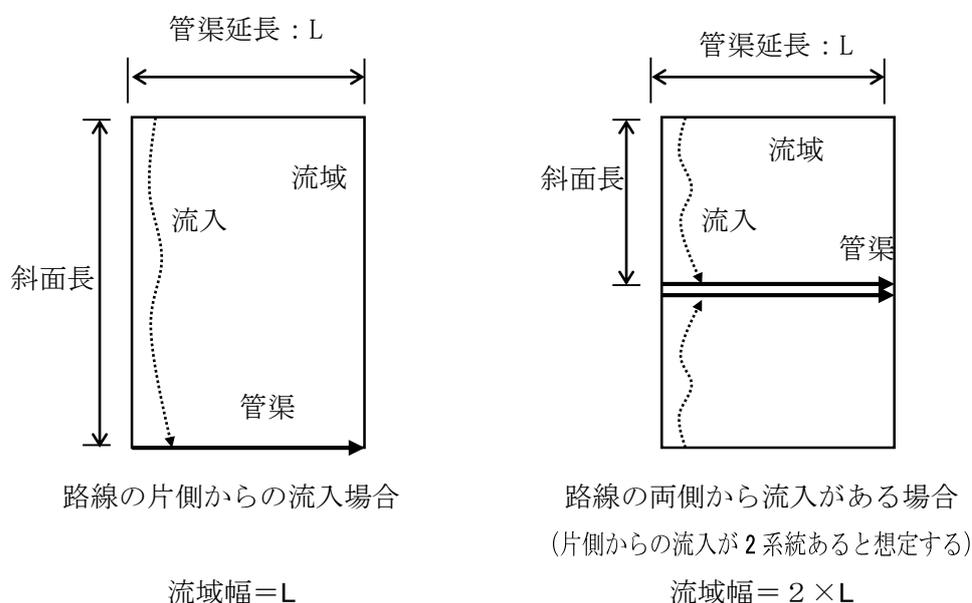


図 4-1 流域幅の概念

（3）流域勾配

都市部の場合は、道路側溝等から下水道管渠に集水するため、道路の横断勾配を用いることが一般的である。

(4) 管渠の粗度係数

下水道管渠の場合には、ほぼ一般値を使用することで問題ない。河川等土砂堆積がある場合には状況によっては調整する。

(5) 地表面の粗度係数

土地利用の状況により変更するが、特別考慮しなければならない状況が無い場合は一般値を用いる。