

## 第4章 流出解析モデルを用いた雨天時浸入水解析

### 4-1 浸入水量算定モデルについて

#### (1) 浸入水量算定モデルの適用

雨天時浸入水は、分流式下水道汚水管渠の施設計画段階において考慮されておらず、本来、浸入を許容するものではないが、実際には多くの都市で、非常に大きな量が生じており、問題への対策が求められている。

前章の検討により、従来から行われている浸入箇所の調査・補修対策を行うことで、雨天時浸入水は着実に減少することが示された。この対策は浸入水削減という本来の目的のためには欠くことのできない重要なものではあるが、費用がかかることや対策が長期に渡ることが多く、目に見える効果を上げられない都市も多い。

そのような理由から、短期に効果を発揮する対策として、管渠・ポンプ施設の増強や貯留池の運転対応等が求められているが、この対策のためには、複雑な既存下水施設における定量評価を行い、その影響度を評価するとともに、計画降雨等に対してどのような状況になるかを把握する必要がある。

しかし、雨天時浸入水が原因で生じる溢水などの問題は、大降雨時に発生する可能性が高く、このようなときに実際の流量を測定することは不可能であるとともに、雨天時浸入水量や溢水箇所の特定をすることは困難である。

そこで本検討では、これまでの調査から、通常の雨水流出よりも流出率は低いものの、降雨の波形と非常に近似した雨水浸入が発生していることに着目し、実降雨を用いて地表面流出と管内水理を計算している”雨水流出解析モデル”が適用できるものと考え、モデル適用の可能性について検討を行うものとする。

雨水流出解析モデルについては、「流出解析モデル利活用マニュアル、(財)下水道新技術推進機構、1999年」において、使用実績の多いものとして以下の3つが紹介されている。

#### ①HydroWorks (ハイドロワークス)

本モデルは1975年にイギリスの水理研究局とウォーリングフォード水理研究所で開発されたシミュレーションモデルを改良したシミュレーションシステムである。

#### ②MOUSE (マウス)

本モデルは1980年にデンマーク大学環境工学研究所が水文学的分野を、一方、デンマーク水理研究所が水理学的分野を担当して開発されたもので、目的に応じて各モジュールを選択するシミュレーションシステムである。

#### ③XP-SWMM (エックスピースイム)

本モデルは1969年頃にアメリカのEPA、フロリダ大学等を中心に開発された雨水管理モデルであり、これをXPソフトウェア社が改良したシミュレーションシステムである。これらのモデルはいずれも一般に市販されているものであり、その用途、適用性に大差は無い。そこで、本調査ではこれらの中からXP-SWMMを用いるものとした。

## (2) 流出解析モデルの概要

流出解析モデル XP-SWMM の構成は、大きく以下の2つに分けられる。

①地表面流出モデル

②管内水理モデル

ここでは、雨水流出解析に用いられる XP-SWMM の基本的な理論について整理を行う。

### 1) 地表面流出モデルについて

地表面流出モデルは、大きく降雨損失モデルと地表面流出モデルの2種類に大別される。

#### a) 降雨損失モデル

・浸透損失

降雨初期の場合には有効降雨が、地表面を湿らせるのに費やされ、流出することはない。また、有効降雨が地下に浸透する量よりも多くなると、流出が始まり下水管へ達する。この地下に浸透する損失量は、土地の利用状況により異なり、一般にホートンの浸透能方程式等で表される。

$$\text{【ホートン式】 } f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \dots\dots\dots \text{式4-1}$$

$f$  : 浸透損失 (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 (1/sec)

$t$  : 時間 (sec)

・窪地(凹地)貯留損失

降雨流出は、窪地にたまった後、それを越えたものが地表面を通過して下水管に達する。この窪地にたまる損失の部分は地表面(浸透域、不浸透域)の状況により異なる。

#### b) 地表面流出モデル

地表面流出は、各小流域で得られる有効降雨を管きよで流入ハイドログラフに変換するもので、以下に示す方法がある。

・非線形貯留法

貯留と流出量 $Q$ との関係式を、 $S = k \cdot Q^m$ のような非線形方程式で与える。この式と連続の式を組み合わせたもので、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非常に薄い層として概念化されている。

$S$  : 貯留量( $m^3$ )

$Q$  : 流出量( $m^3/s$ )

$k, m$  : 定数

$t$  : 時間 (sec)

## 2) 管内水理モデルについて

### a) 完全サンブナン式 (Saint-Venant) モデル

完全サンブナン式は、開水路の不定流計算の基本式であり、式 4-2、式 4-3 に示すように質量保存式と運動量保存式で表現される。

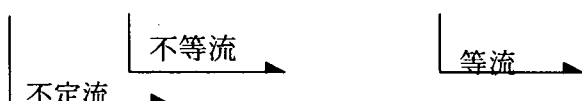
下水管は、通常は開水路の流れであるが、豪雨時に能力が不足すれば圧力管状態になり、降雨が弱くなると再び開水路になるという特性を持っている。サンブナン式は、自由水面流について成り立つ式であるため、近似的に解く方法として、プライスマンスロット (Preissman Slot) を設ける。この方法は、下水管の頂部に仮想的なスロットを設け、圧力は水位で与えることにより連続的に解くことを可能とした。

また、プライスマンスロットが地表面よりも大きく飛び出すと、正確な解析が出来なくなるため、計算の中では、地表面より上には各ノードに大きな皿状の貯留池を持たすことにより、水位の上昇を防ぐようにして、地表面に溢水した状況を再現している。

図 4-1 にプライスマンスロットの概念を、図 4-2 に地上部モデル化の概念を示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 4-2 (質量保存式)}$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} - S_o + S_f = 0 \quad \dots\dots \text{式 4-3 (運動量保存式)}$$



- $Q$  : 流量(m<sup>3</sup>/s)
- $t$  : 時間 (s)
- $x$  : 流下距離(m)
- $A$  : 断面積(m<sup>2</sup>)
- $h$  : 水位(m)
- $\theta$  : 水平面との角度 (ラジアン)
- $S_o$  : =sin $\theta$  (下水管の勾配)
- $S_f$  : 摩擦勾配
- $g$  : 重力の加速度

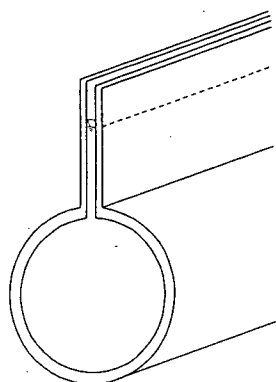


図 4-1 プライスマン・スロット概念図

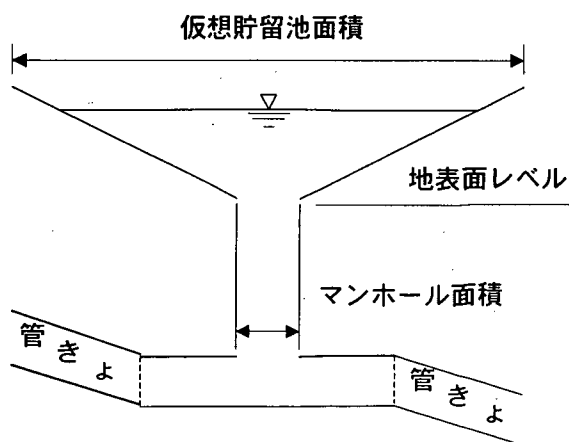


図 4-2 地上部モデル化概念図

## 4-2 解析に係わるパラメータ

本調査における降雨の流出解析モデルとして「XP-SWMM」を用いるのは前述のとおりであるが、その中で用いる各種パラメータや重要な理論について整理する。

### (1) 流出にかかるパラメータ

#### 1) 不浸透域率

今回解析に用いる流出解析モデル (XP-SWMM) における最も重要なパラメータの一つとして、不浸透域率が上げられ、全排水区域面積に占める不浸透域の割合で表される。

一般に、不浸透域とは排水区域内で雨水が地下へ浸透しない部分をいい、屋根や舗装された道路・駐車場等が挙げられる。浸透域としては、間地、裸地、未舗装の道路・駐車場や公園等がある。

#### 2) 流域幅

XP-SWMM における流域幅の考え方は、以下の図 4-3 に示す通りであり、排水区の形状によって設定値は若干異なり、基本的には、流域の幅を計算するために設定するパラメータである。XP-SWMM では、各区画割における主要水路長を求め、区画の形状ファクターを勘案し設定する。形状ファクターや流域幅は、XP-SWMM のマニュアルの中で以下の通り定義されている。

$$S_k = (A_2 - A_1) / A \dots\dots\dots \text{式 4-4}$$

$$W = (2 - S_k) \times L$$

ここで、 $S_k$  : 形状ファクター

$A$  : 区画割の面積 (ha)

$A_1$  : 区画割の右側の面積 (ha)

$A_2$  : 区画割の左側の面積 (ha)

$A$  : 区画割の面積 (ha)

$W$  : 区画割の流域幅 (m)

$L$  : 区画割の主要水路長 (m)

通常の区画割の状況は、区画のほぼ中央に管きよが通っており、形状ファクター ( $S_k$ ) としては 0 とし、流域幅  $W = 2L$  と設定する方法が一般的である。・・・ 図 4-3 a

面積一定の時、この流域幅の入力値を大きく取るほど流出が早くなる傾向である。・・・

図 4-3 b

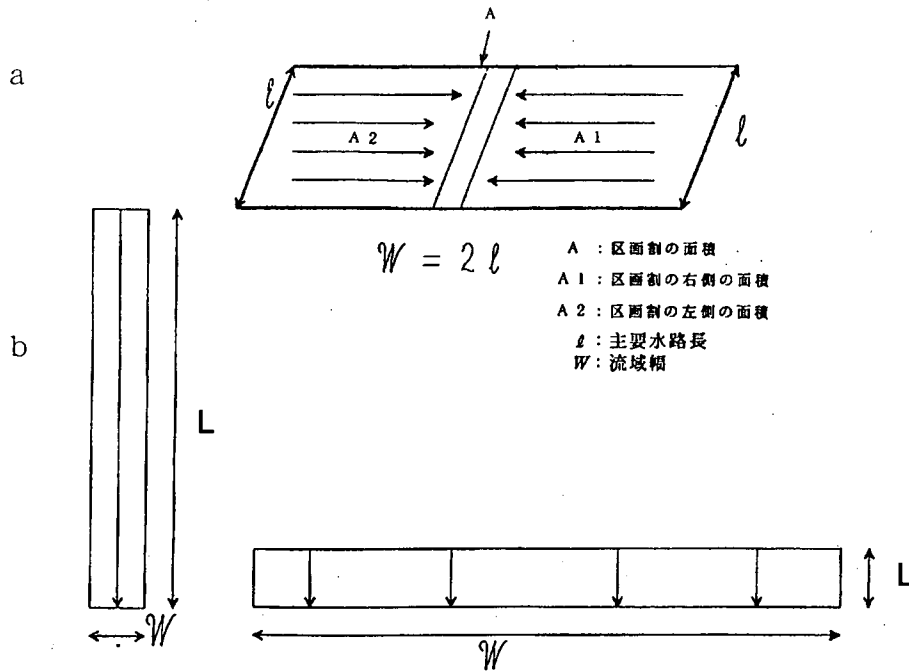


図4-3 SWMMにおける流域幅の考え方

### 3) 流域勾配

表面流出の解析に用いられるパラメータであり、対象の排水区域における平均的な勾配を設定する。排水区が平坦な場合、通常、道路の縦断面勾配を設定する。流域勾配の入力値が大きくなると流出は早まり、小さくなると遅れが生じる。

#### (2) 損失にかかるパラメータ

##### 1) 窪地貯留深

降雨の初期に表面流出が発生するまで地表面に貯留される量（いわゆる水たまりを指す。）であり降雨量(mm)で設定する。窪地貯留深に比例した流量の初期損失が発生する。

##### 2) 浸透域

流出解析モデルの既定値として6mmであり、また、「合流式下水道越流対策と暫定指針；1982，日本下水道協会」（以下、暫定指針）においても浸透域の窪地貯留深として6mmが報告されている。

##### 3) 不浸透域

モデルでの既定値は2mmとしている。「暫定指針」でも不浸透域の窪地貯留深は2mmが報告されている。

##### 4) 直接流出域率

不浸透面のうち、屋根等直接雨水樹に繋がっており、降雨初期の窪地貯留を見込めない区域を表現するパラメータである。

#### (3) マニング係数

浸透域、不浸透域双方に与えられる地表面パラメータで地表面粗度を表す。マニング係数の入力値が大きくなると流出は遅くなり、小さくなると流出は早まる。

1) 浸透域

モデルにおける既定値は 0.03 となっている。

2) 不浸透域

モデルにおける既定値は 0.02 となっている。

(4) 浸透能 (ホートン方程式)

地表面から土壌に浸透する水の能力を示すもので、浸透域の浸透の状況を表現する際に用いる。「暫定指針」では都市域の平均的な最終浸透能 10mm/hour のみ報告されている。初期浸透能や減衰係数は、排水区における流出特性 (実測の流量データ等) を勘案し決定することとなり、キャリブレーションのパラメータの一つとなる。

ホートン方程式は以下の通りである。

$$F_p = F_c + (F_0 - F_c) \cdot e^{-kt} \dots\dots\dots \text{式 4-5}$$

ここで、 $F_p$ : 土壌の浸透能 (mm/hour)

$F_c$ : 最終浸透能 (mm/hour)

$F_0$ : 初期浸透能 (mm/hour)

$t$ : 降雨開始からの時間 (sec)

$k$ : 減衰係数 (1/sec)

図 4-4 にホートン方程式の概念を示す。

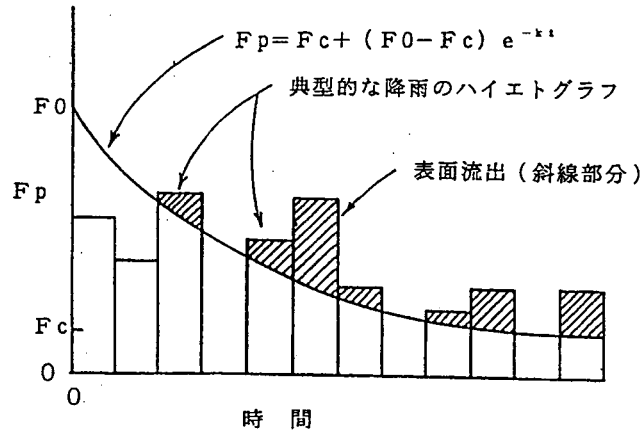


図 4-4 ホートン方程式の概念

1) 初期浸透能

モデルにおける既定値は 20mm/hour となっている。

2) 最終浸透能

解析モデルにおける既定値として 10mm/hour としている。また、「暫定指針」においても都市域の平均的な最終浸透能は 10mm/hour と報告されている。

3) 減衰係数

解析モデルでの既定値は 0.001 1/sec となっている。

### 4-3 流域のモデル化

#### (1) 管渠モデルの構築

管渠網は、原則として主要な管渠とする。ただし、K市のデータは、区域が2.3haと小さいため、全管網をモデル化する。なお、管渠網のモデル化は既設管渠調査結果をもとに行った。

#### 1) K市管渠モデル条件

- ①排水区域面積            2.3ha
- ②管渠延長                798.6m (全管網)
- ③管径                     $\phi$  250mm
- ④平均管渠延長           約 350m/ha

モデル化の概要図を図4-5に示す。

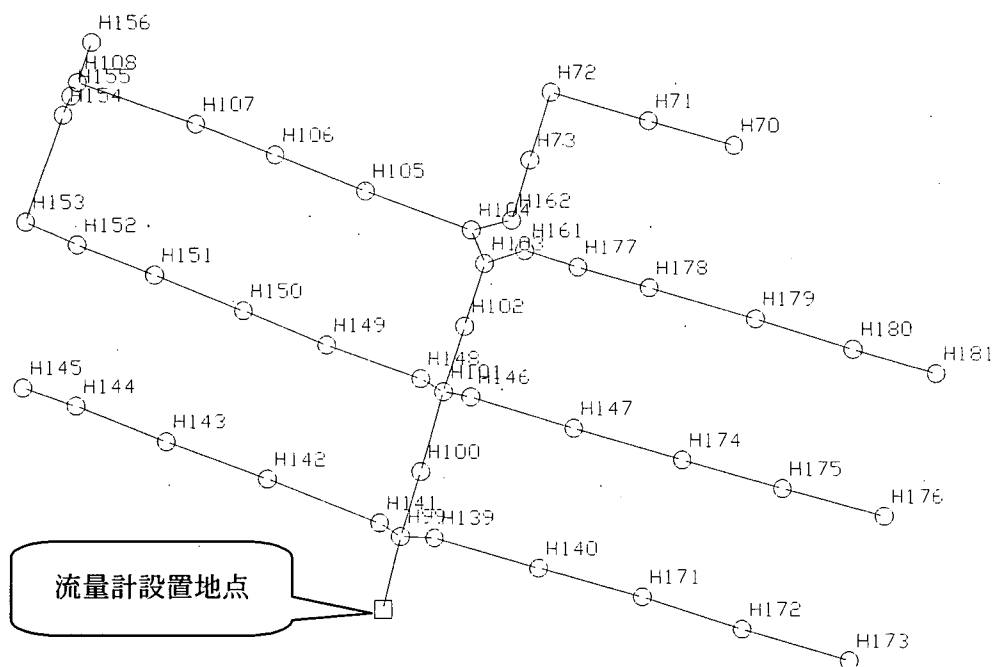


図4-5 K市管網図

## 2) U市管渠モデル条件

- ①排水区域面積 298.65ha (流量測定点での面積 2.36~60.93ha)
- ②管渠延長 14755.9m
- ③管径  $\phi 250\text{mm} \sim 1,650\text{mm}$
- ④管渠密度 約 20~200m/ha (流量測定点受け持ち流域値)

モデル化の概要図を図4-6に示す。

なお、U市では15箇所の測定点があるが、背水の影響を受けるブロックや複雑な管網のブロック等があるため、今回の検討では、比較的上流部にあり背水等の影響を受けないブロックである4、6、7、8ブロックを解析対象ブロックとして選定した。

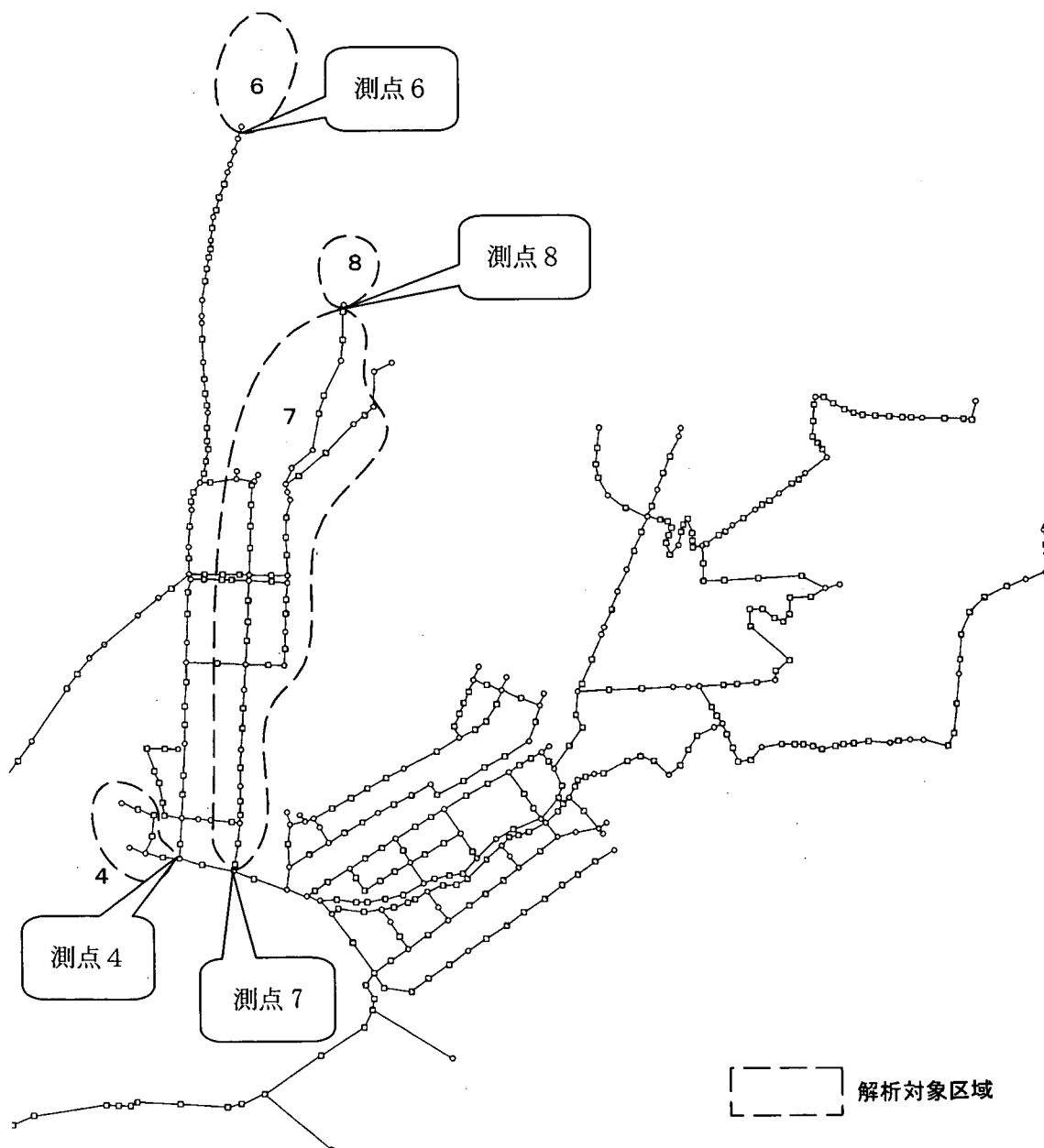


図4-6 U市管網図



## (2) 不浸透域率の設定

流域のモデル化は、不明水流入の主たる原因が誤接等による雨水の直接流入によるものと想定されることから、降雨を図4-7に示すように分類し、有効降雨のうち、太線に示した降雨が浸入水として管渠内に流入するものと仮定した。

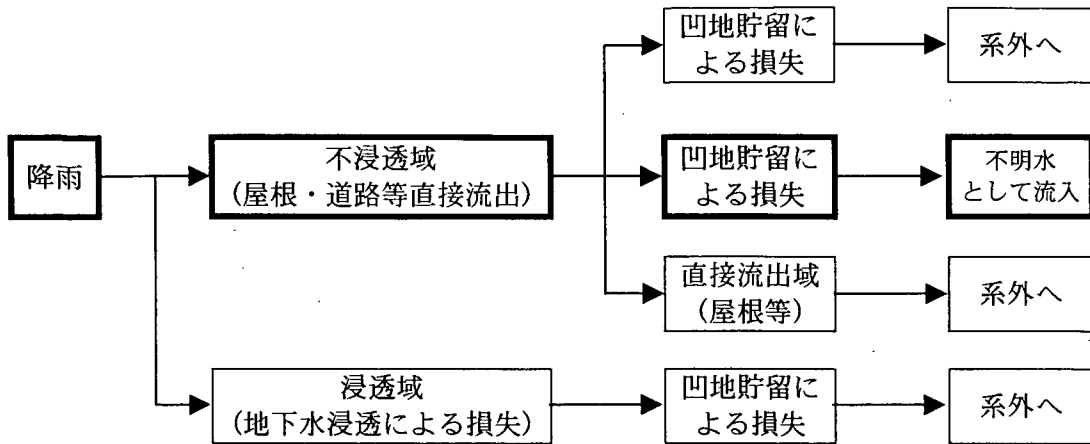


図4-7 モデル上での不明水の考え方

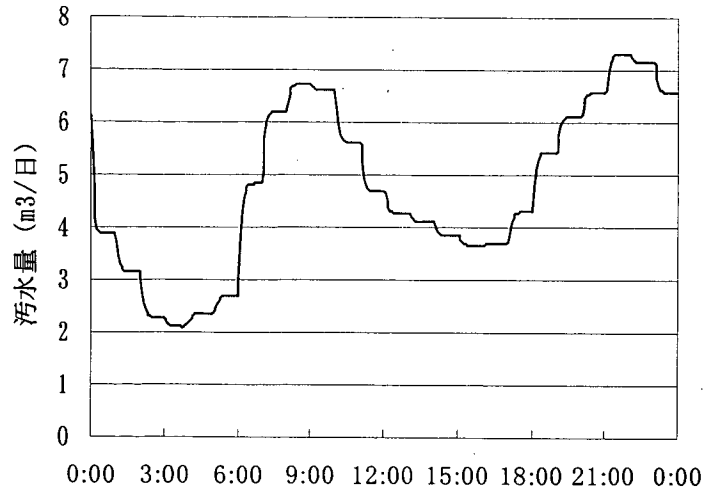
そこで、本計画では浸入水解析に雨水流出解析モデルを用いるため、通常的手法とは異なり、この不浸透域率もキャリブレーション項目として取り扱うものとする。

## (3) 晴天時汚水量

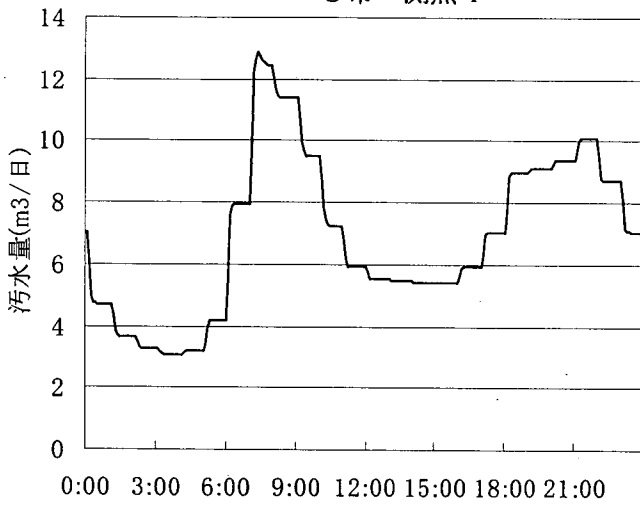
調査地区の晴天時汚水量は、第2章で整理された結果をモデル化する。XP-SWMMでは、このデータを基に1時間毎の変動率で設定した。

図4-8に、K市とU市の晴天時流量設定値を示す。

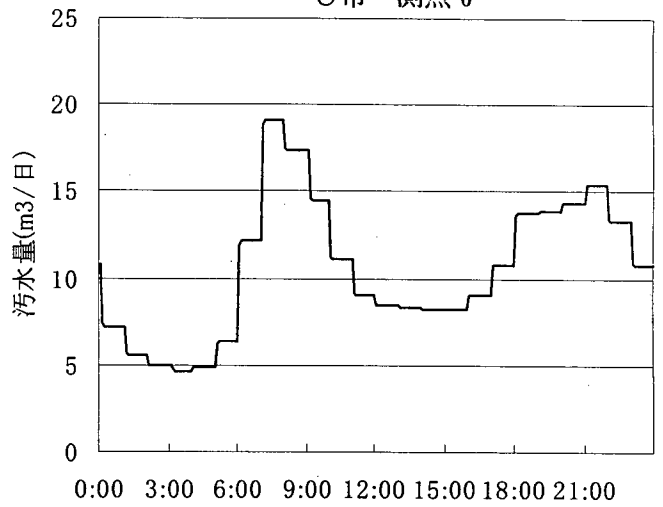
K市



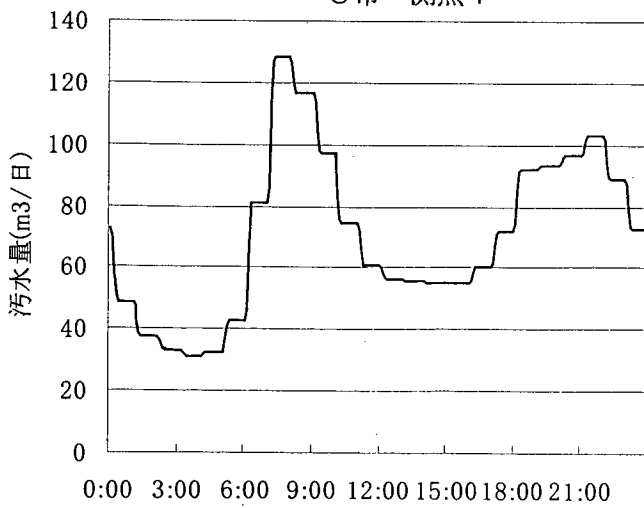
U市 测点4



U市 测点6



U市 测点7



U市 测点8

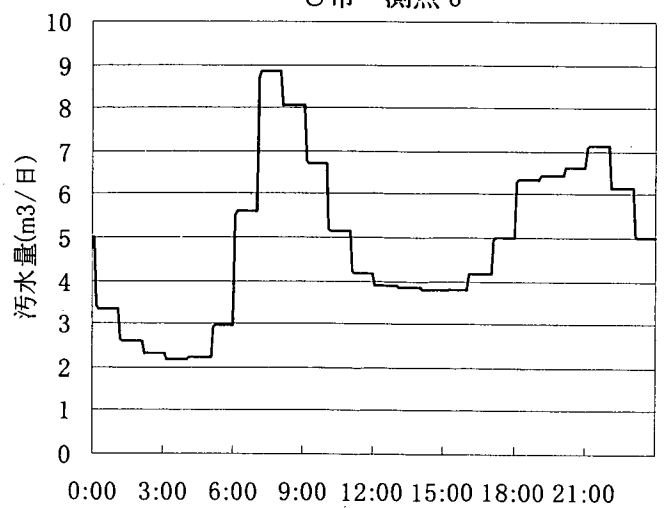


图4-8 晴天时流量设定值

#### 4-4 モデル解析用定数の設定

実測データを基に、最適パラメータ値の設定を行う。なお、対象流域が2地区あるため、K市とU市において流域で最適パラメータ値の設定方法について検討を行い、その最適な値に関する評価を行う。

##### (1) 検討対象降雨の整理

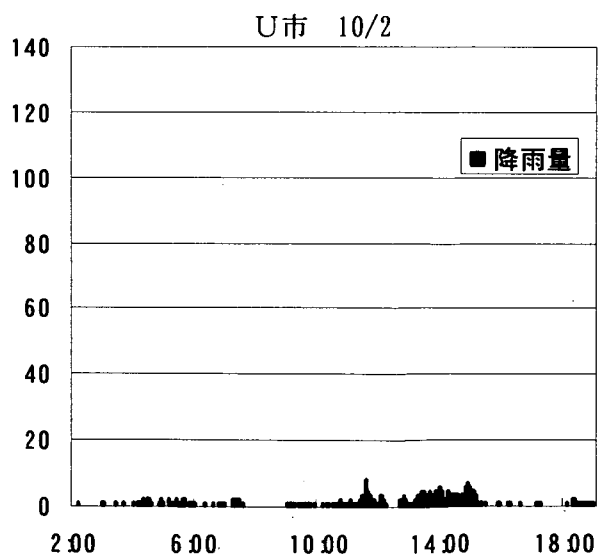
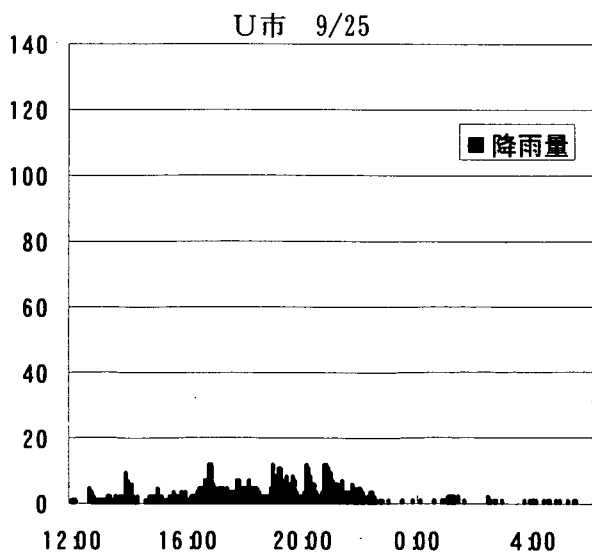
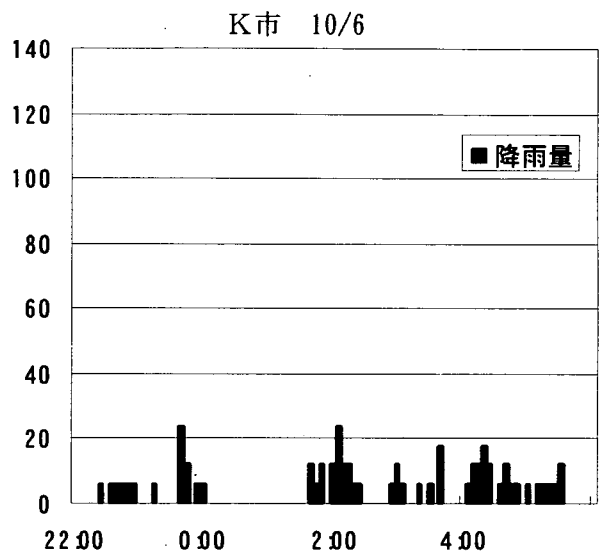
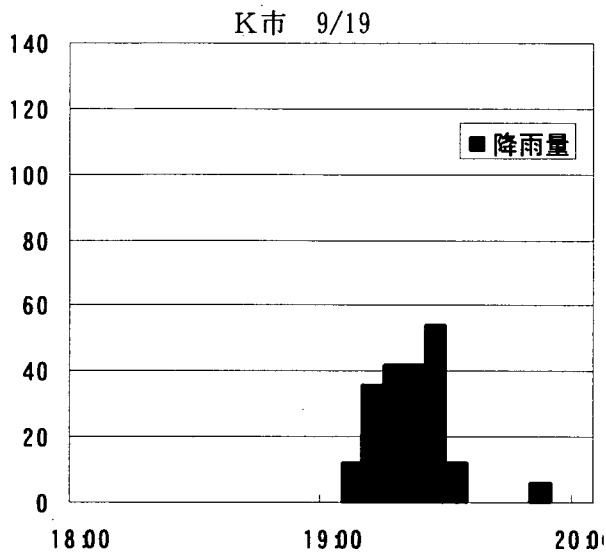
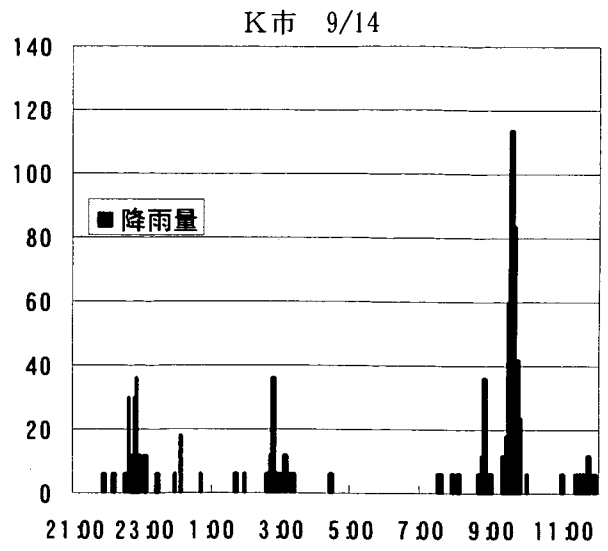
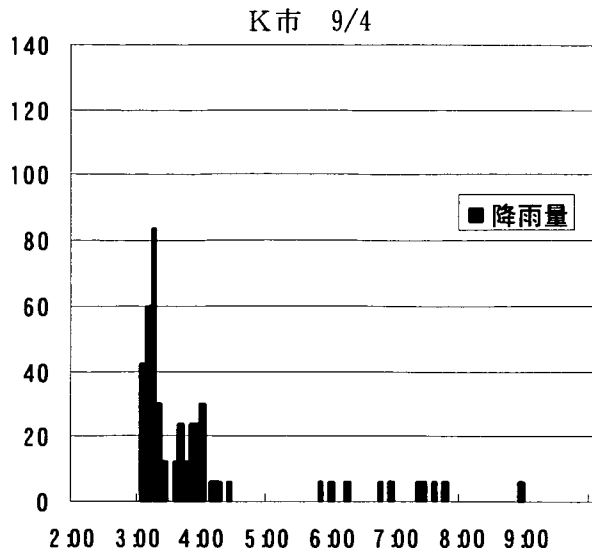
K市については、補修前の1999年7月から10月初旬までをモデル解析定数設定の対象とするが、3章で用いた降雨データは1時間ピッチであるためモデルで使用することは出来ない。そこで、消防署屋上で1999年9月～10月に計測されている5分ピッチ降雨データを用いるものとし、9/4、9/14、9/17、10/6の4降雨を対象とした。なお、9/20の降雨については、複数の連続降雨になっているため、浸入水の正当な評価が出来ない。そこで、今回の評価からは除外する。

U市については、1997年9月25日と10月2日の2日分の降雨データが取られているため、このデータを用いて検討を行う。このデータも5分ピッチのものである。

今回の対象降雨の概要を表4-1に、降雨状況を図4-9に示す。

表4-1 解析降雨

地点名	降雨日	降雨継続時間 (hr)	総降雨量 (mm)	最大降雨強度 (mm/hr)
K市	1999/9/4 3:00～9/4 9:00	6	36.0	84.0
	1999/9/14 13:00～9/15 12:00	23	71.0	114.0
	1999/9/17 19:00～9/17 20:00	1	17.0	54.0
	1999/10/6 22:00～10/7 6:00	9	31.5	24.0
U市	1997/9/25 12:00～9/26 6:00	18	45.8	12.0
	1997/10/2 2:00～10/2 19:00	17	21.1	8.4



縦軸 ; 降雨強度 (mm/hr)、横軸 ; 時刻

図4-9 解析降雨

(2) 浸入水率の検証

今回のモデル化に当たっては、実態調査により算出した浸入水率をモデル中の不浸透域率に反映させることで雨天時浸入水を再現している。モデル解析定数設定の対象降雨による浸入水率の算定結果を表4-2、4-3に示す。

K市の浸入水率については、4降雨の平均が3.72となったが、9/17は他の3降雨に比べて若干浸入水率が小さいため、これを除いた3降雨の平均値から4.0を適用した。U市については、各ブロック毎に不浸透域を設定するものとし、それぞれ2降雨の平均値を適用した。

表4-2 K市における浸入水率

降雨日	総降雨量 (5分データ) (mm)	浸入水量 (1分データ) (m <sup>3</sup> )	浸入水率 (%)
1999/9/4 3:05~9/4 4:15	31.0	29.90	4.16
1999/9/15 7:30~9/15 10:00	37.5	37.68	4.33
1999/9/17 19:05~9/17 19:50	17.0	10.57	2.68
1999/10/6 22:25~10/7 5:30	31.5	27.06	3.70
平均値			3.72
9/17を除く平均値			4.06

表4-3 U市における浸入水率

ブロック	日付	測点	面積 ha	A 総降雨量 mm	B 総浸入水量 m <sup>3</sup>	B/(A・面積) 浸入水率 %
No. 4	1997/9/25		3.67	46	111	6.58
	1997/10/2		3.67	21	31	4.02
	平均					5.30
No. 6	1997/9/25		13.00	46	95	1.59
	1997/10/2		13.00	21	40	1.47
	平均					1.53
No. 7	1997/9/25	No. 7	35.71	46	1,437	8.75
		No. 8	12.45	46	105	1.83
		No. 9	8.83	46	50	1.23
		差分	14.43	46	1,282	19.31
	1997/10/2	No. 7	35.71	21	352	4.69
		No. 8	12.45	21	40	1.53
		No. 9	8.83	21	16	0.86
		差分	14.43	21	296	9.77
	平均					14.54
	No. 8	1997/9/25		12.45	46	105
1997/10/2			12.45	21	40	1.53
平均						1.68

### (3) 最適解析定数の設定

#### 1) K市における検討

XP-SWMM を用いて流出解析をするための解析定数のうち、主要な設定値の考え方を表 4-4 に示す。今回の検討では、「流域幅」と「不浸透域率」の値を変えることで、4 ケースを行った。

表 4-4 K市における最適解析定数の設定

	ケース A-1 (図 4-10)	ケース A-2 (図 4-11)	ケース B-1 (図 4-12)	ケース B-2 (図 4-13)
概要	一般的な雨水流出で用いるパラメータ値を用い、浸入水量を絞るため、浸透域からは流出ししないように設定し、不浸透域率を浸入水率と同等に設定した。(不浸透域に降った雨は全量出てくるため、流出量は同じである)	ケース A-1 において、管渠に入ってくるまでの経路が通常の雨水よりも複雑で、ロスも多いと考え、地表面粗度を高く設定し検証した。	ケース A-1 において、管渠に入ってくるまでの経路が通常の雨水よりも複雑で、時間が掛かるものと想定し、地表流下延長を長くするよう設定した。	ケース B-1 において、管渠に入ってくるまでの経路が通常の雨水よりも複雑で、ロスも多いと考え、地表面粗度を高く設定し検証した。
面積	実面積を使用	同左	同左	同左
不浸透域率	4% (複数の降雨において浸入水率が同様の数値であったため、浸入水率と同等の数値を設定)	同左	同左	同左
流域幅 (流域幅が大きくなるほど流入が早くなる)	管渠延長の 2 倍 (平均管渠延長 350m/ha)	同左	管渠密度を 50m/ha と設定	同左
流域勾配	0.032 (流域の平均勾配)	同左	同左	同左
管渠粗度係数	0.013	同左	同左	同左
不浸透域	窪地貯留	0mm	同左	同左
	粗度係数	0.02	0.5 (雨水に比べ、ロスが大きく浸入が遅くなるものと考え大きな値を設定した)	0.02
	直接流出域率	0	同左	同左
浸透域	窪地貯留	999mm (浸入してこない最大値を設定した)	同左	同左
	粗度係数	0.03	同左	同左

評価	ピーク高さ	ピークの高さは、約1.5～2.2倍程度実測よりも高くなっており、解析結果は合っていない。	ピークの高さは、約1.2～1.7倍程度実測よりも高くなっており、ケースA-1よりも実測には近づいたが、解析結果は合っていない。	ピークの高さは、約1.3～1.6倍程度実測よりも高くなっており、ケースA-1よりも実測には近づいたが、解析結果は合っていない。	ピークの高さは、約0.8～1.3倍程度と実測に非常に合ってきている。ただし、降雨強度が弱い10/6の降雨では、ピークが明確に検出されなくなってしまうことから、強い降雨強度に対して有効なパラメータと考えられる。
	波形	実測値に比べ、解析値では切り立っており、浸入水の立ち上がり方も早くなっている。	ケースA-1に比べるとピークも下がり、波形も丸くなっているが、実測の波形とは異なっている。10/6の弱い降雨では、流入の立ち上がり方が近似している。	ケースA-1に比べるとピークも下がり、波形も丸くなっているが、実測の波形とは異なっている。全体的には、ケースA-2と近似している。	このケースでは、9/4、9/14、9/17等の強い降雨強度において、非常に傾向が合ってきている。反面10/6の弱い降雨においては、波形が丸くなりすぎている。
	問題点	ピークを下げ、浸入水を送らせるような配慮が必要である。	強い降雨では、個々の流域面積が小さいため、不浸透域の粗度係数を上げても十分な効果は上げることが出来ない。地表流下延長等を長くすることが必要である。	ケースA-1に比べると実績には近づいているが、まだ近似していないため、ピークを下げ、浸入水を遅らせるような配慮が必要である。	弱い降雨強度に対しては、あまり流入のロスをつけすぎると再現が困難となってしまうことが分かった。
	評価	適用できない×	△	降雨強度が弱い雨では、適用できる。 ○	強い降雨に対しては適用できる○
総合評価		今回の検討の結果、降雨強度の違いにより解析定数の設定を変える必要があることが分かった。これは、1降雨単位で浸入水率をみると浸入水率にあまり差は現れないが、ピークの部分に着目すると弱い降雨強度の雨に比べ、強い降雨強度の際には、ある程度流入に遅れが発生する傾向にあることがわかった。これは、地中等を通過し管内に流れ込む浸入水が、強い降雨強度の際には、ある一定の流入速度（浸透能）を越えた当たりから、一時的に地表面に滞水し、その後、地中を通して管内に浸入するためでないかと考えられる。今回の検討は4降雨と少ないため、その境界や相関を見いだすことは出来なかったが、複数のパラメータを使う必要があるものと考えられる。			

・パラメータのまとめ

以上の検討からK市のモデルでは、弱い降雨強度の時はケース B-1 を、強い降雨強度の時はケース B-2 を採用するものとする。表4-5にシミュレーション設定値を示す。

表4-5 流量のシミュレーション条件の初期設定

項 目		設定値 1 (強い降雨強度)	設定値 2 (弱い降雨強度)	摘要	
流量	解析対象管きよ	全管網	全管網	対象流域が 2.5ha と小さかったため	
	不浸透域率	4 % 浸入水率に合わせる	4 % 浸入水率に合わせる		
	流域幅	管渠密度を 50m/ ha と設定	同左		
	流域勾配	0.032 流域の平均値	0.032 流域の平均値		
	凹地貯留深	浸透域	999.0 mm	999.0 mm	浸透域からの流出 がないように設定
		不浸透域	0 mm	0 mm	
	地表面粗度係数	浸透域	0.030	0.030	
		不浸透域	0.5	0.02	
	管きよ粗度係数		0.013	0.013	
	直接流出域率		0 %	0 %	
ホートン浸透能	初期	- mm/hr	- mm/hr		
	最終	- mm/hr	- mm/hr		



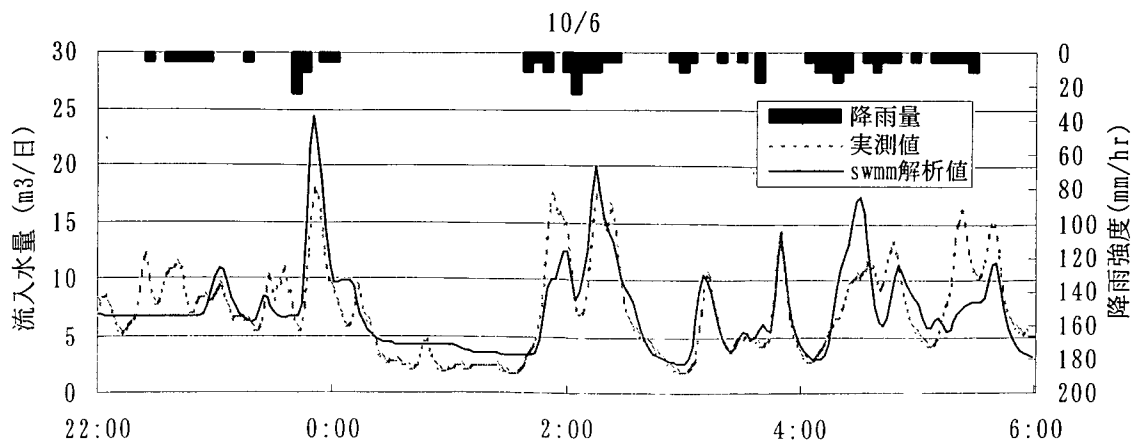
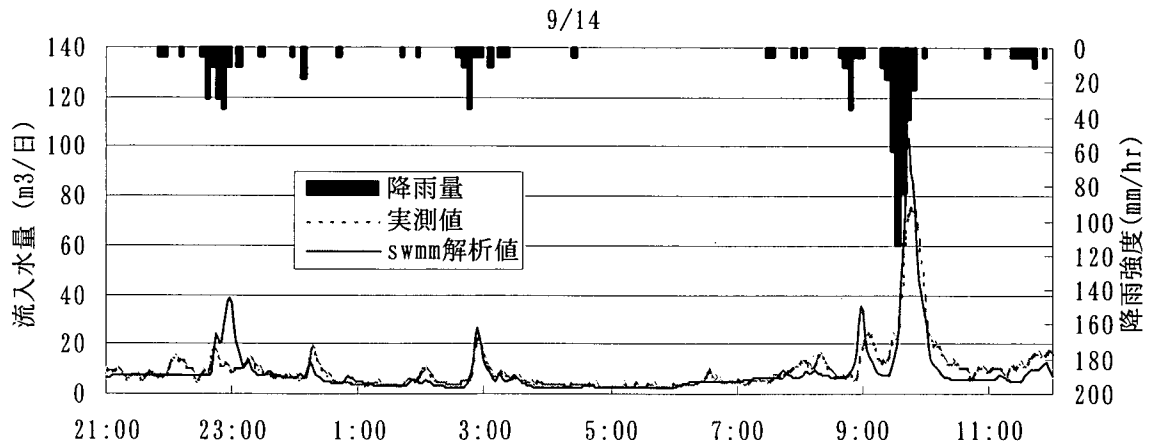
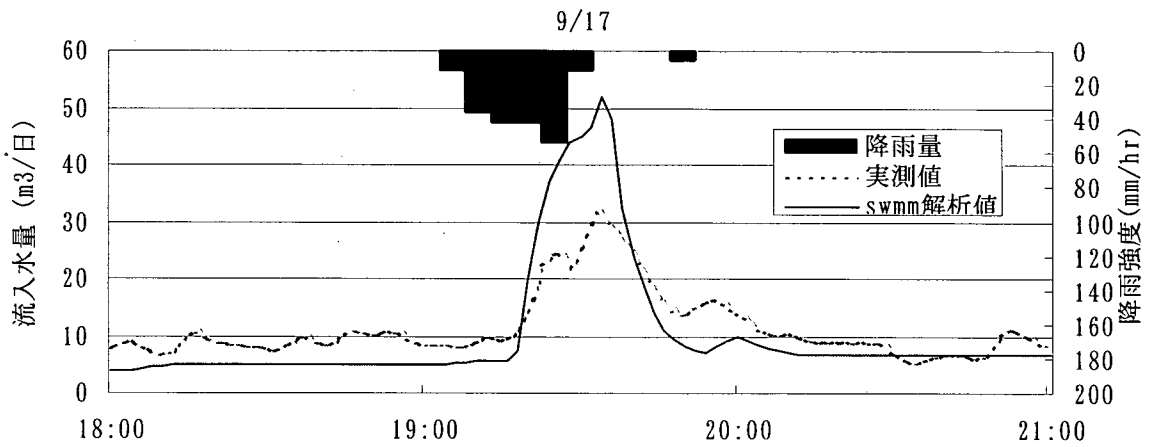
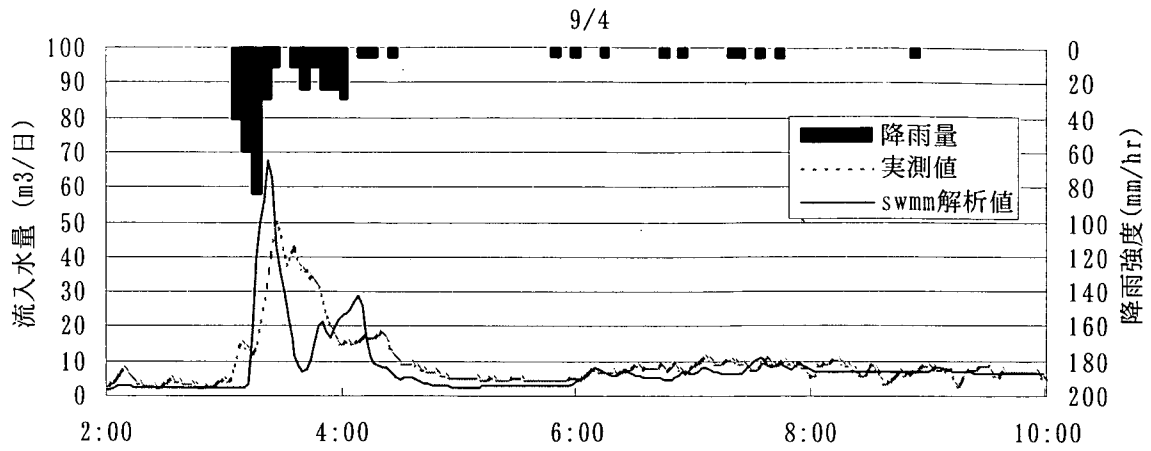


図4-10 K市シミュレーション結果 (ケースA-1)

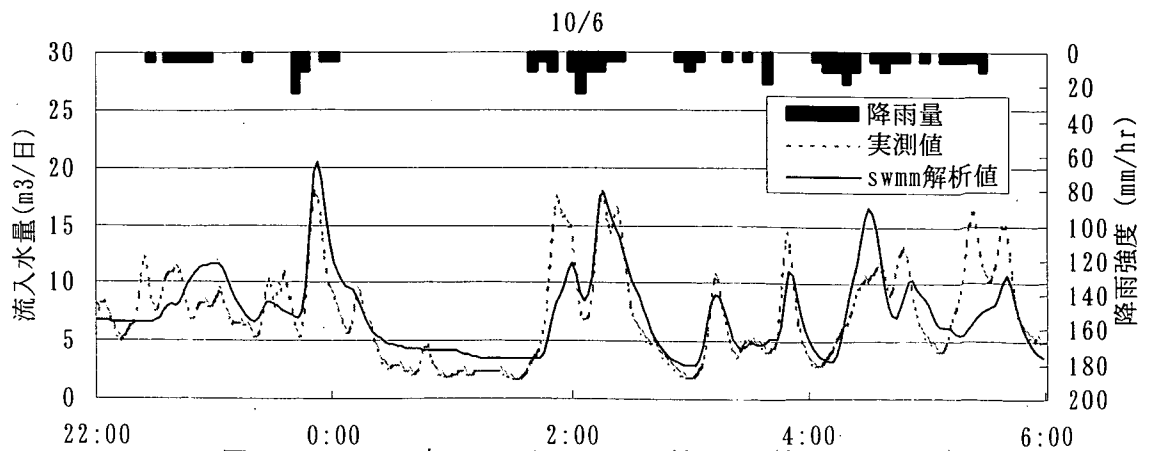
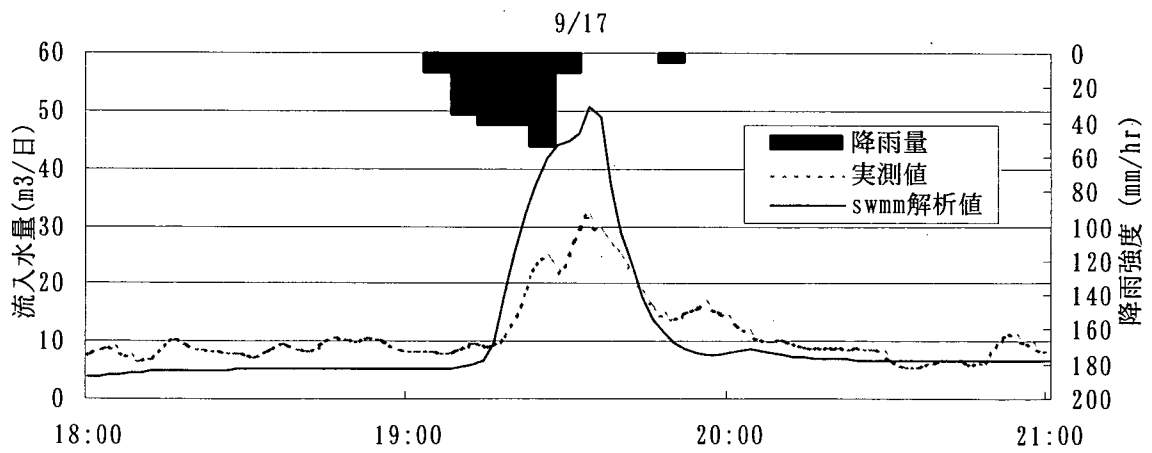
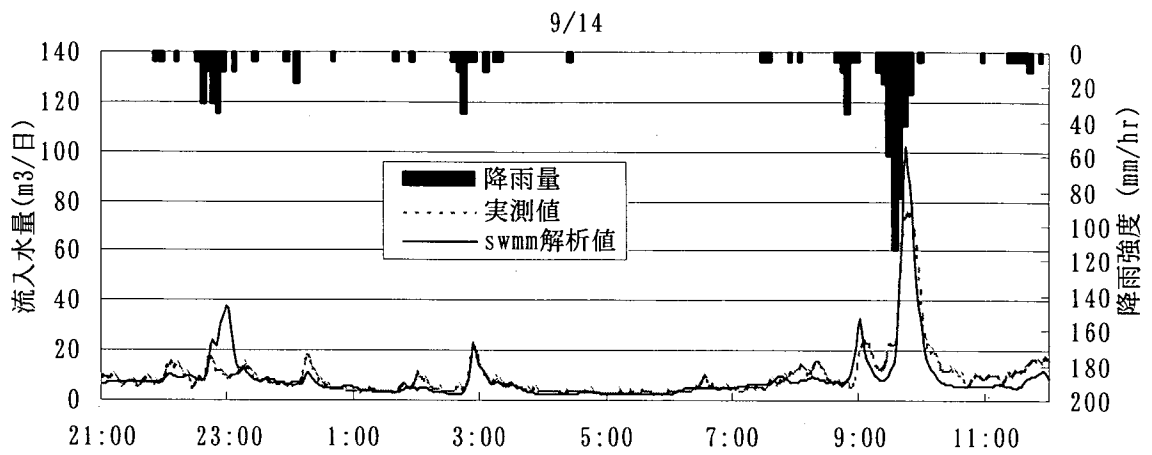
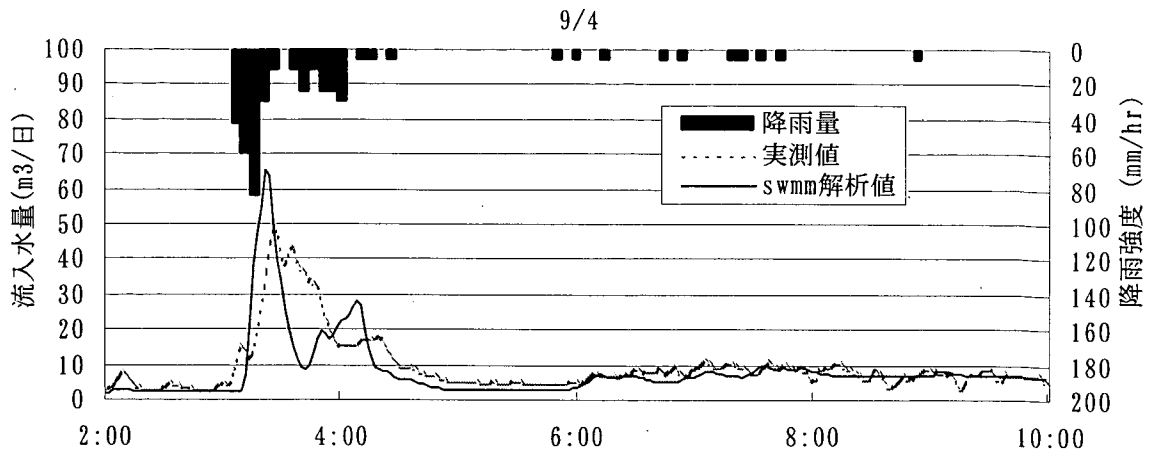


図4-11 K市シミュレーション結果 (ケースA-2)

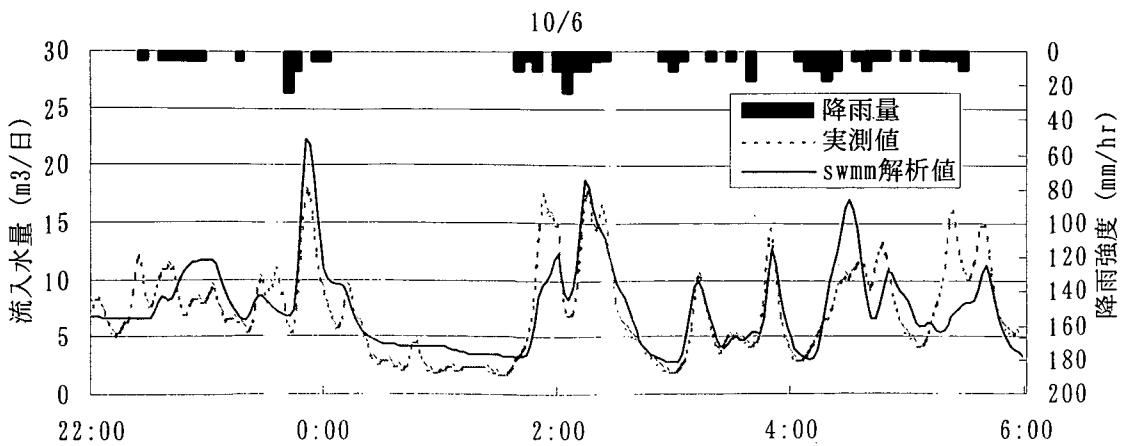
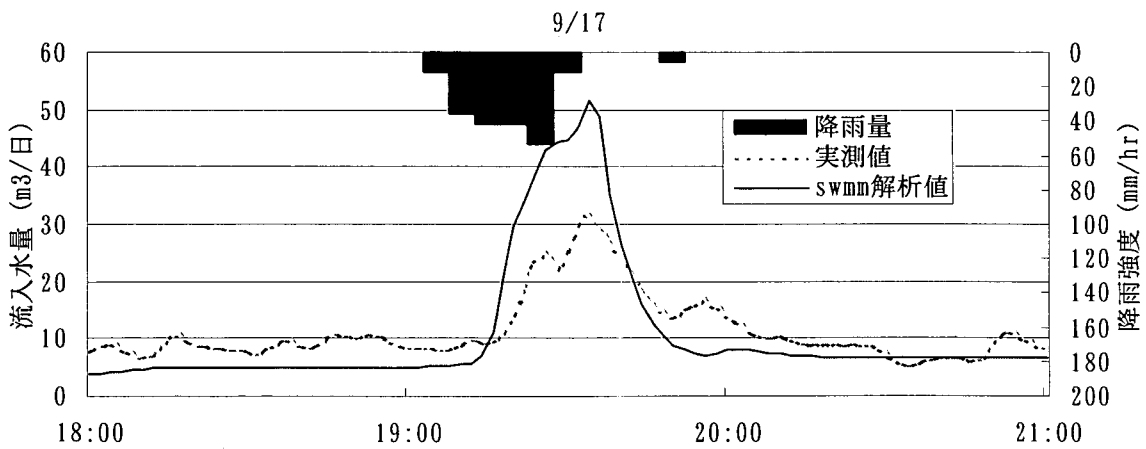
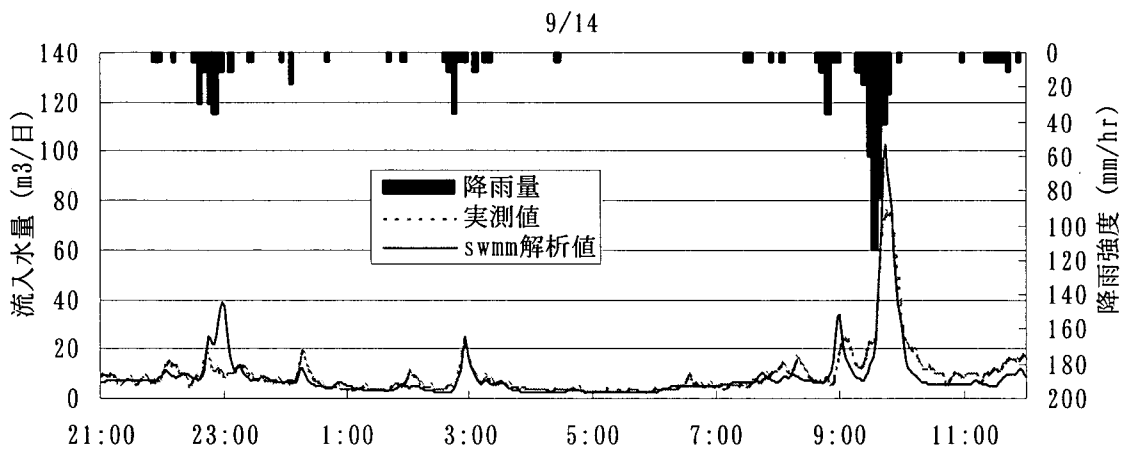
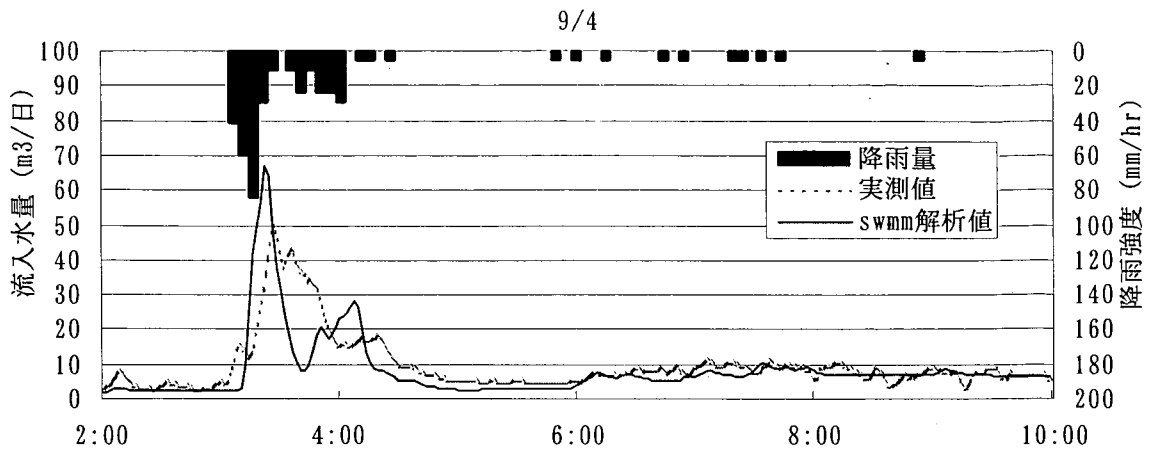


図4-12 K市シミュレーション結果 (ケースB-1)

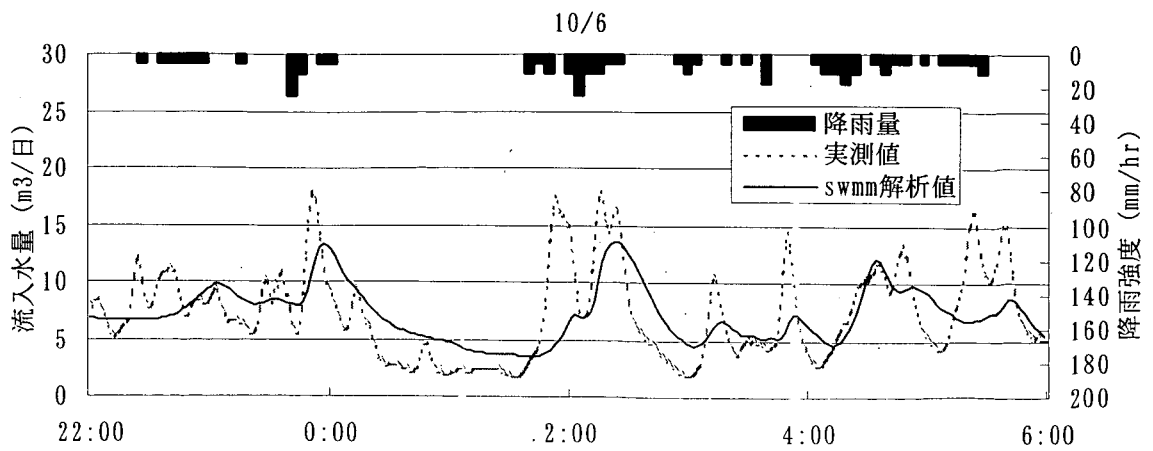
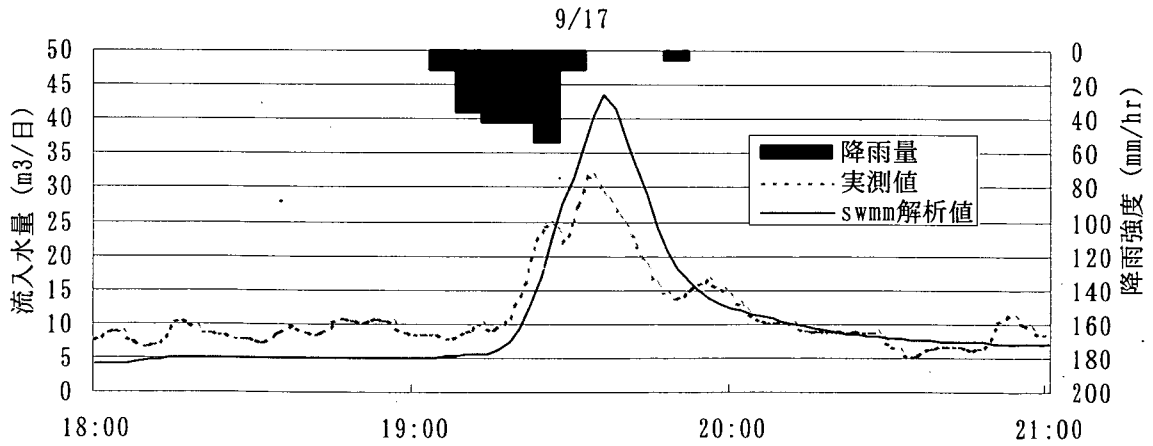
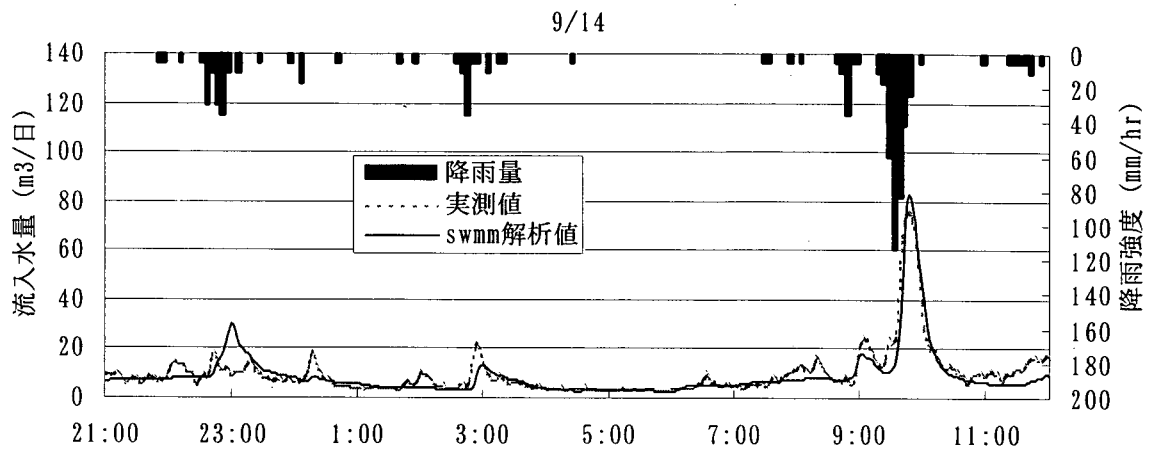
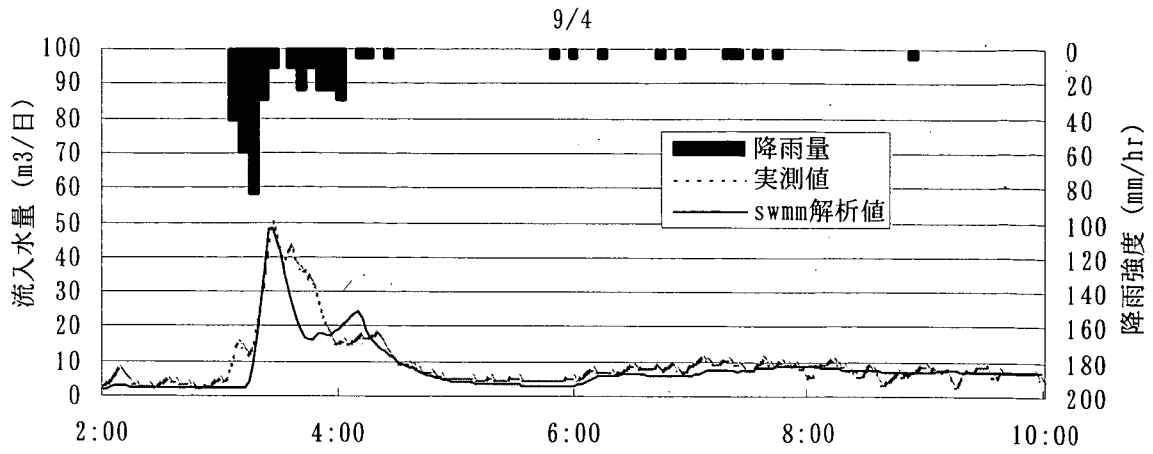


図4-13 K市シミュレーション結果 (ケースB-2)

## 2) U市による検証

XP-SWMM を用いて流出解析をするための解析定数のうち、主要なものについての設定値の考え方を表4-6に示す。今回の検討では、2ケースについて検討を行った。

表4-6 U市における最適解析定数の設定

	ケース1 (図4-14~15)	ケース2 (図4-16~17)	摘 要
概要	一般的な雨水流出で用いるパラメータ値を用い、浸入水量を絞るため、浸透域からは流出ししないように設定し、不浸透域率を浸入水率と同等に設定した。 (不浸透域に降った雨は全量出てくるため、流出量は同じである)	ケースA-1において、管渠に入ってくるまでの経路が通常の雨水よりも複雑で、ロスも多いと考え、地表面粗度を高く設定し検証した。	
面積	実面積を使用	同左	
不浸透域率	各ブロック別に算出した浸入水率と同等の数値を設定	同左	
流域幅(流域幅が大きくなるほど流入が早くなる)	管渠延長の2倍(平均管渠延長20~200m/ha)	同左	
流域勾配	0.02(流域の平均勾配)	同左	
管渠粗度係数	0.013	同左	
不浸透域	窪地貯留	0mm	同左
	粗度係数	0.02	0.30(雨水に比べ、ロスが大きく浸入が遅くなるものと考え大きな値を設定した。ただし、神戸市と異なり、主要な管渠のみモデル化をしているため、神戸市よりも小さな値とした)
	直接流出域率	0	同左
浸透域	窪地貯留	999mm(浸入してこない最大値を設定した)	同左
	粗度係数	0.03	同左
評価	ピーク高さ	ピーク高さは、約0.72~1.27倍(平均0.99倍)程度実測と近似している。	ピーク高さは、約0.61~1.10倍(平均0.83倍)程度実測と乖離しており、ケース1に比べ、ピークの出現高さが低くなっており、解析結果は会っていない。
	波形	ピークの出現時間や浸入水の波形は、実測と近似しているが、ブロック7では、前半の降雨に対し実績よりも大きくなっているが、これは、晴天時汚水量の設定による影響と考えられる	ピークの出現時間は、実測に比べやや遅く、浸入水の波形は、実測よりもなだらかに出現するようになっている。

	問題点	水量が小さいため、汚水量の影響が大きく、降雨波形整合できない流出パターンも多くあった。	弱い降雨強度に対しては、あまり流入のロスをつけすぎると再現が困難となってしまうことが分かった。	
	評価	十分に適用できる○	適用できない×	
総合評価		今回の検討の結果、検討した2降雨においては解析定数の設定を変える必要性はないことが分かった。これは、今回の解析対象降雨の最大降雨強度は、約10mm程度と小さかったためと考えられる。また、今回の検討では、対象区域毎に浸入水率を設定して解析したため、浸入水率が降雨により大きく異なるような場合には適用できない。そこで、今後検討ケースを追加し、最適な再現性を得られる方法を検討していく必要がある。		

#### ・パラメータのまとめ

U市のモデルではK市と異なり、強い降雨でのキャリブレーションができなかったため、設定値は1ケースのみを採用した。表4-7にシミュレーション設定値を示す。

表4-7 流量のシミュレーション条件の初期設定

項 目		設定値1	摘要	
流量	解析対象管きよ	主要な管渠網		
	不浸透域率	各ブロック別に算出した浸入水率と同等の数値を設定		
	流域幅	管渠延長の2倍(平均管渠延長20~200m)		
	流域勾配	0.02 流域の平均値		
	凹地貯留深	浸透域	999.0 mm	浸透域からの流出がないように設定
		不浸透域	0 mm	
	地表面粗度係数	浸透域	0.030	
		不浸透域	0.02	
	管きよ粗度係数		0.013	
	直接流出域率		0 %	
ホートン浸透能	初期	- mm/hr		
	最終	- mm/hr		

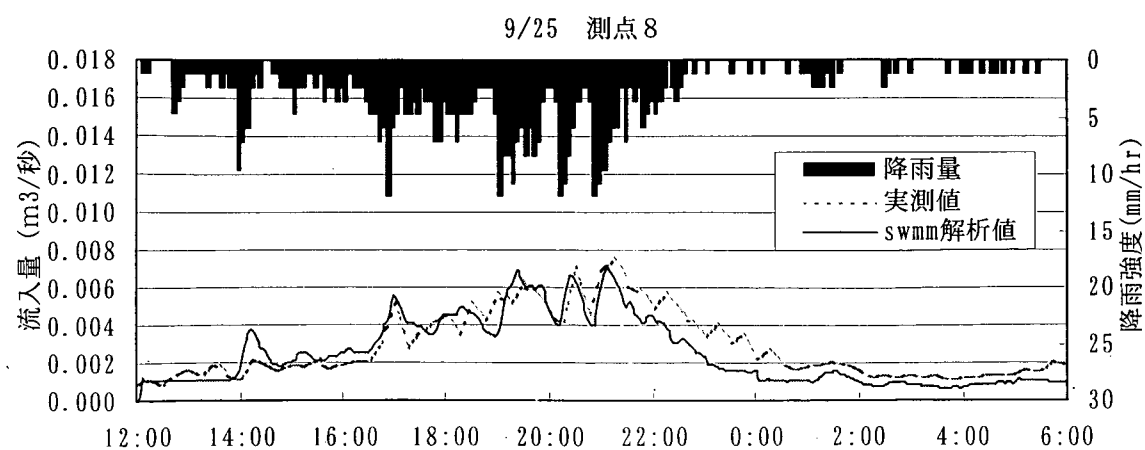
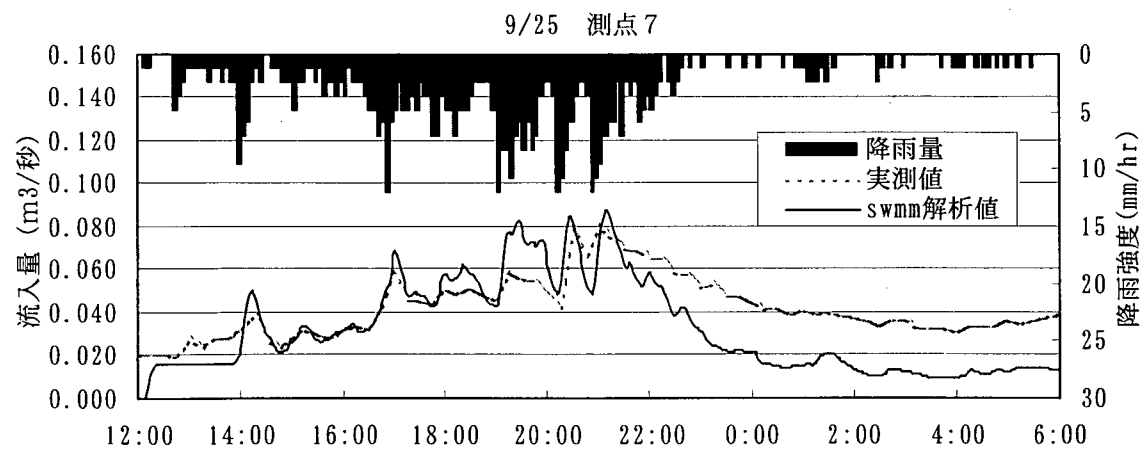
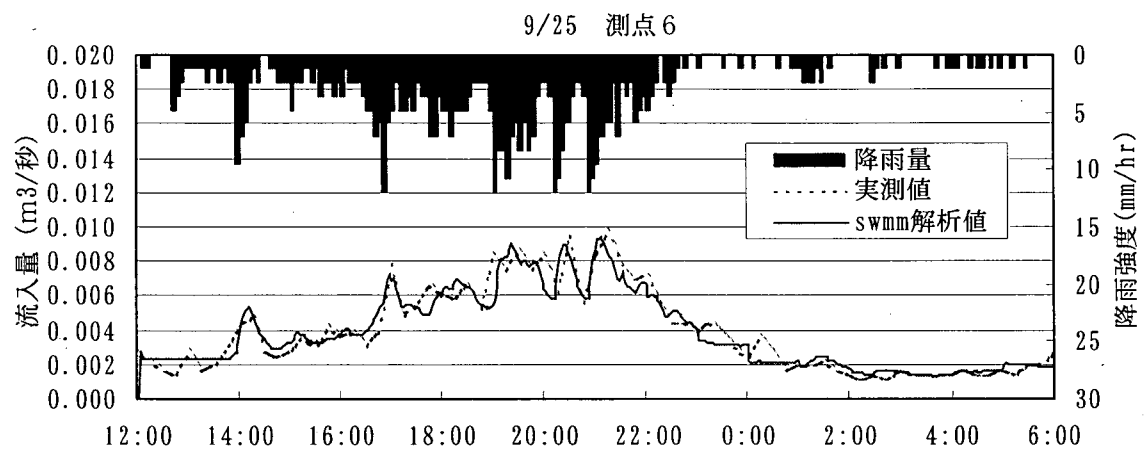
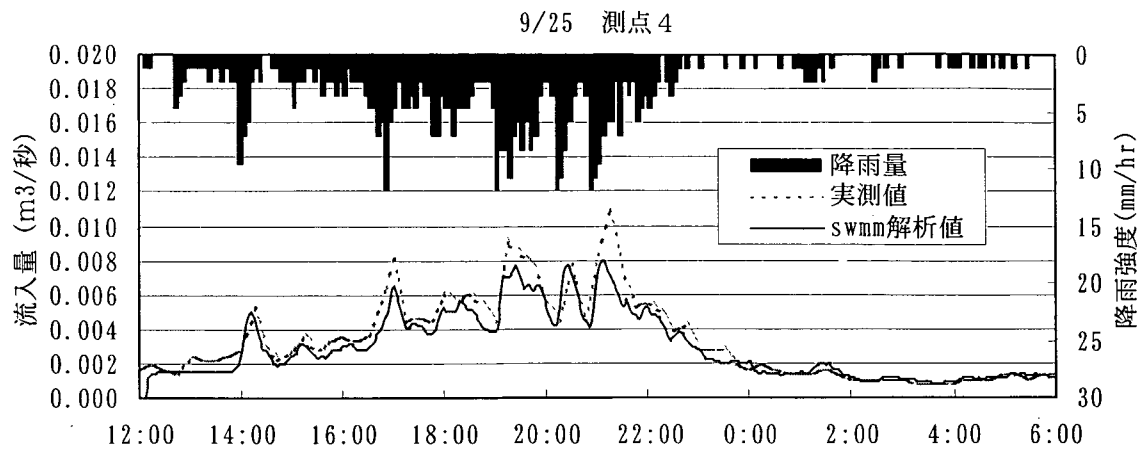


図4-14 U市シミュレーション結果(ケース1) その1

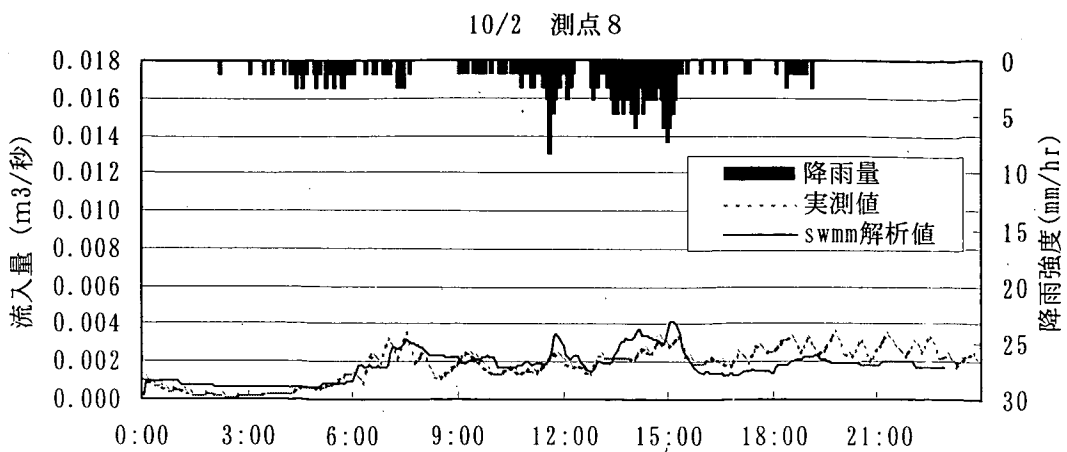
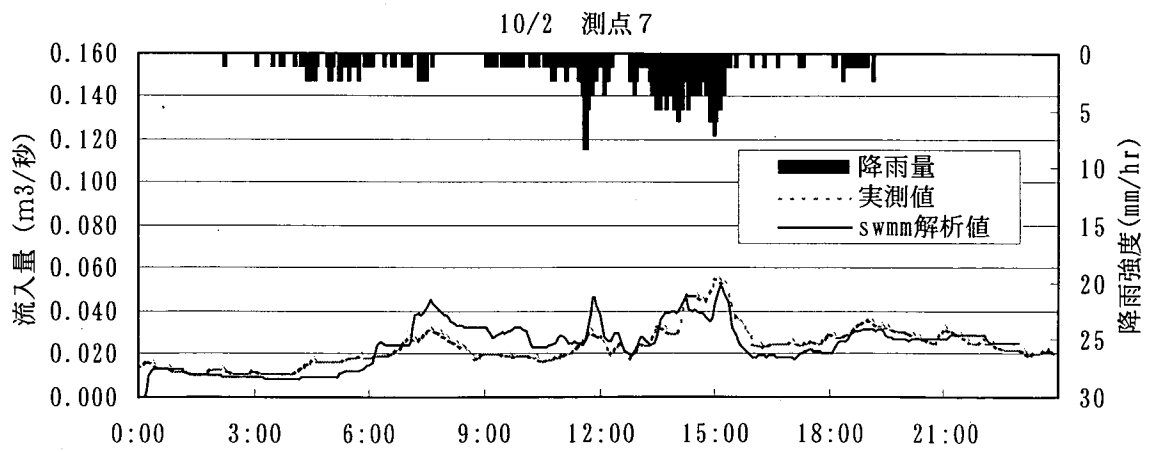
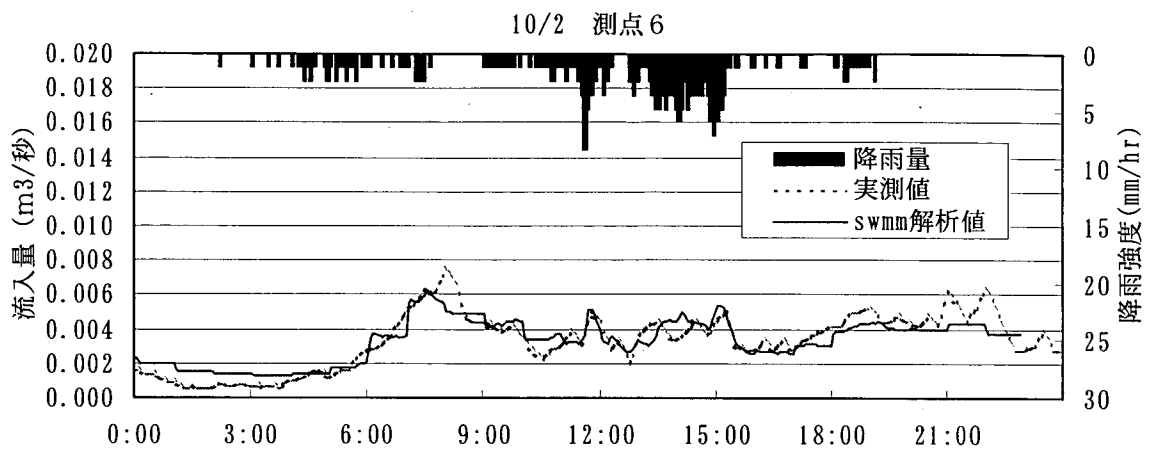
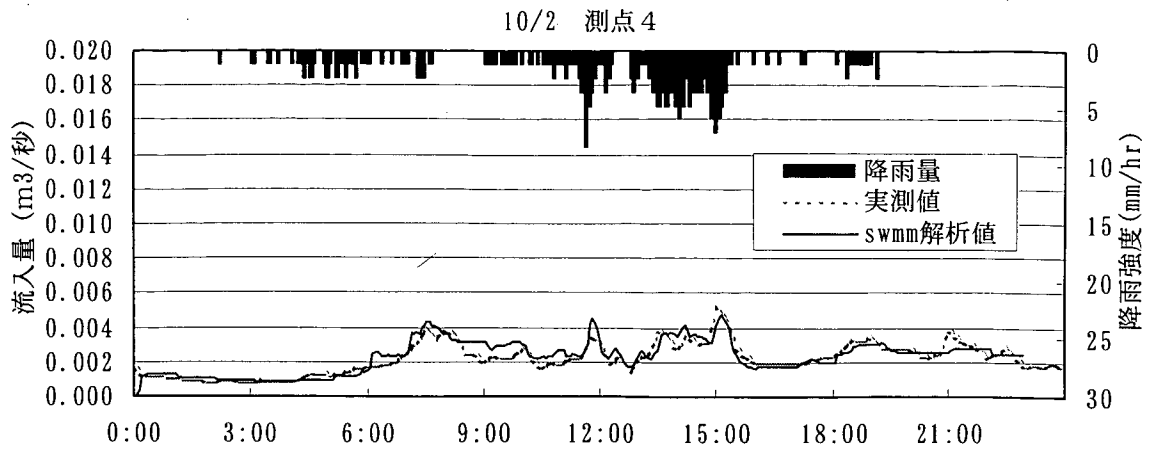


図4-15 U市シミュレーション結果(ケース1)その2



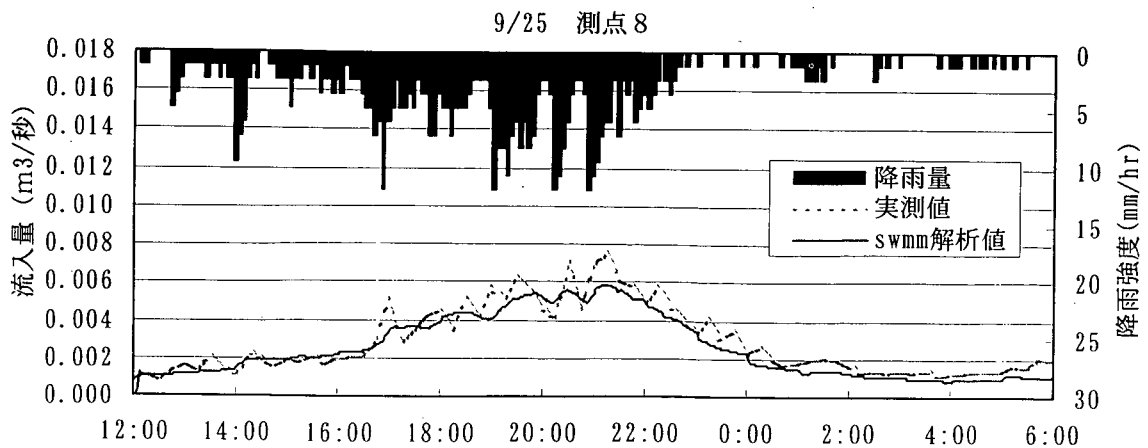
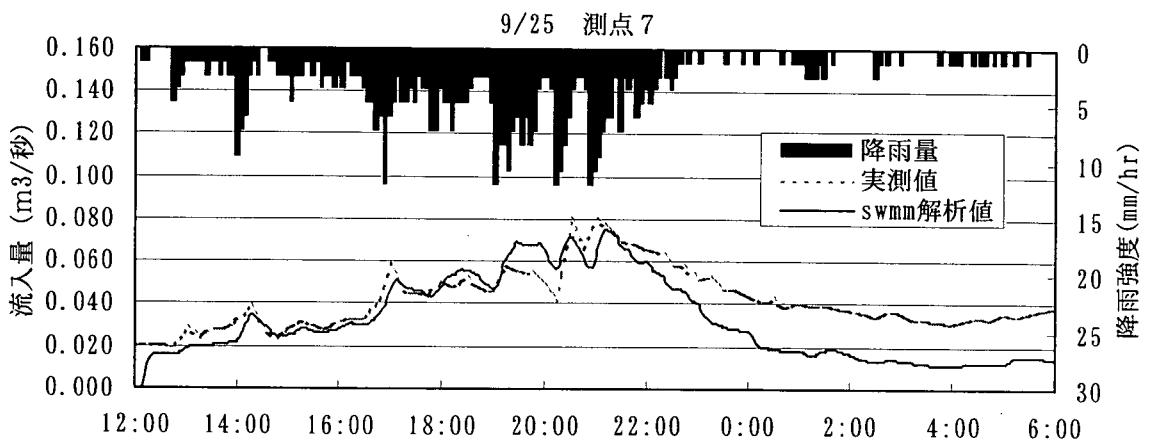
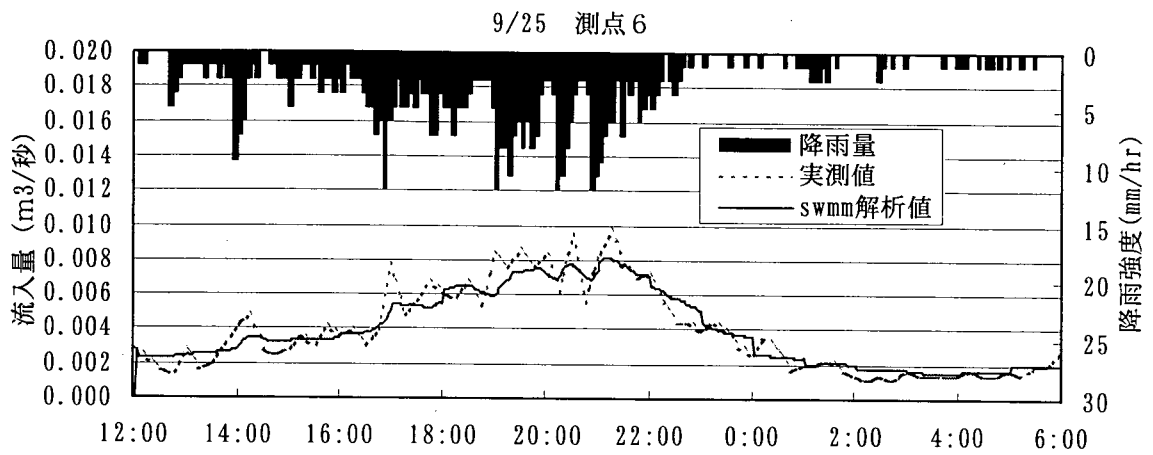
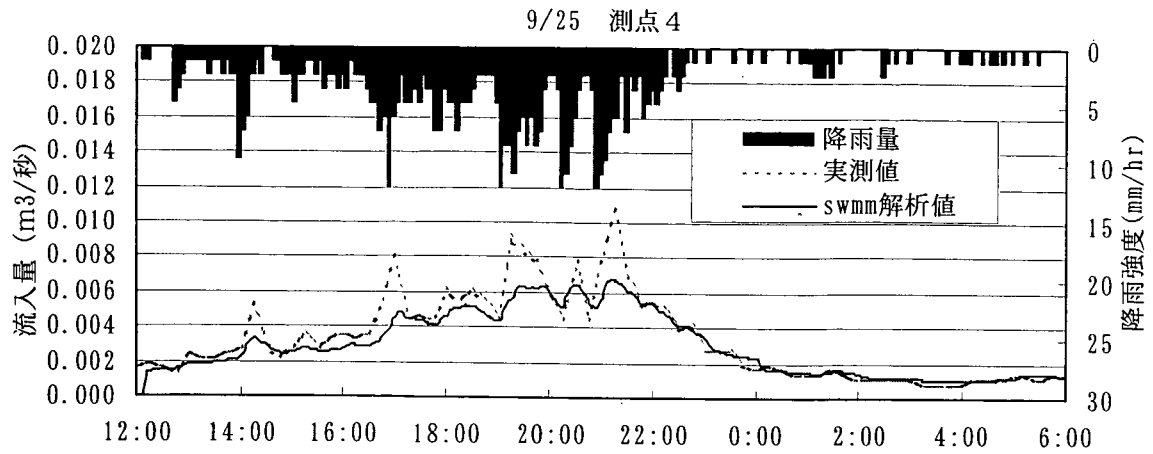


図4-16 U市シミュレーション結果(ケース2) その1

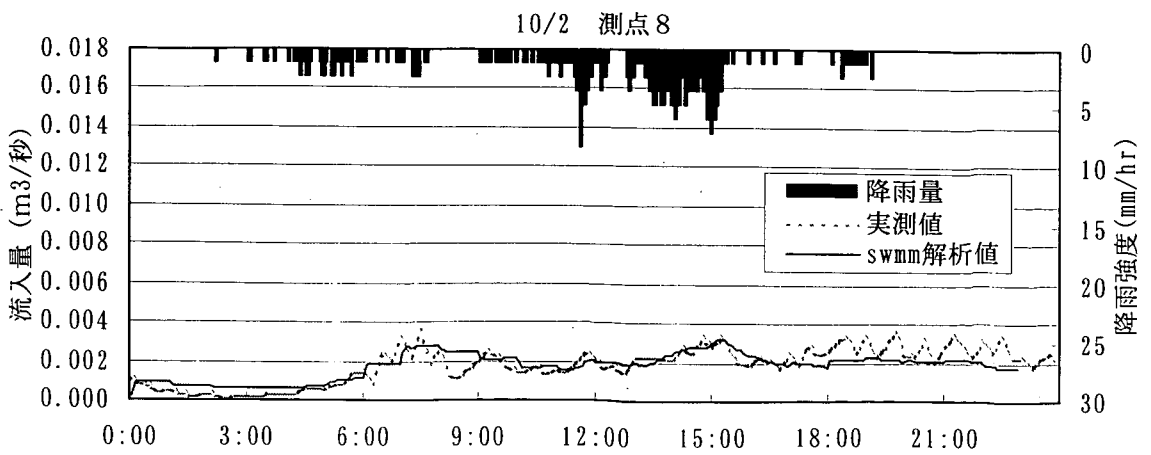
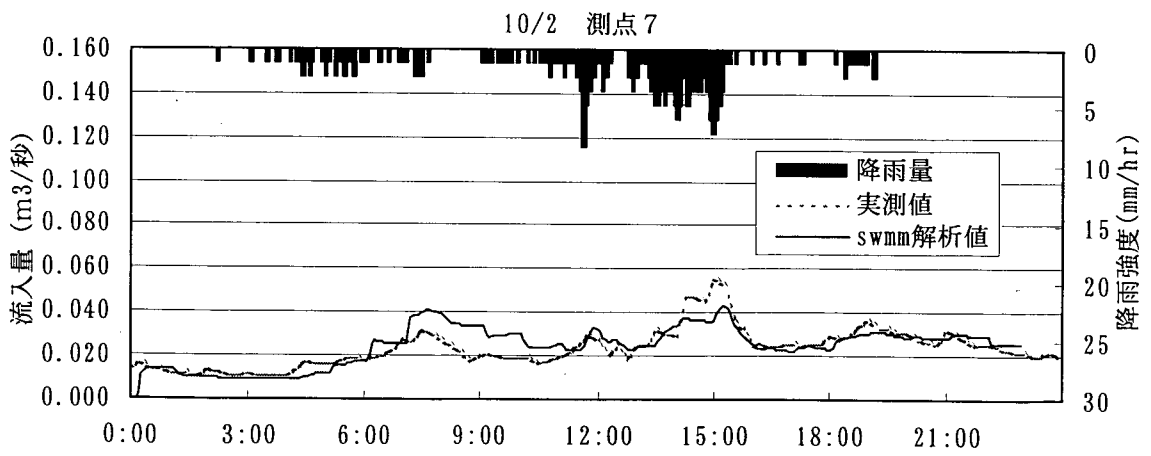
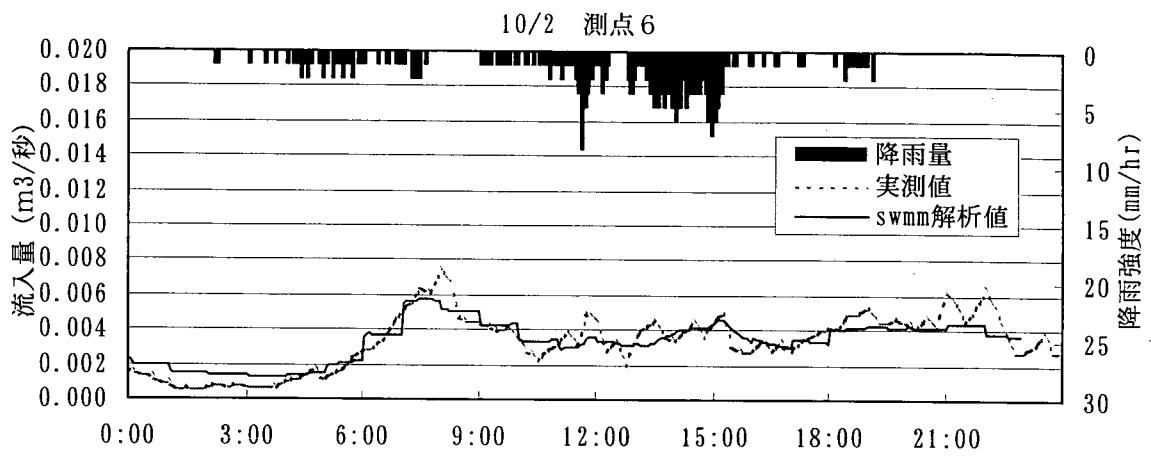
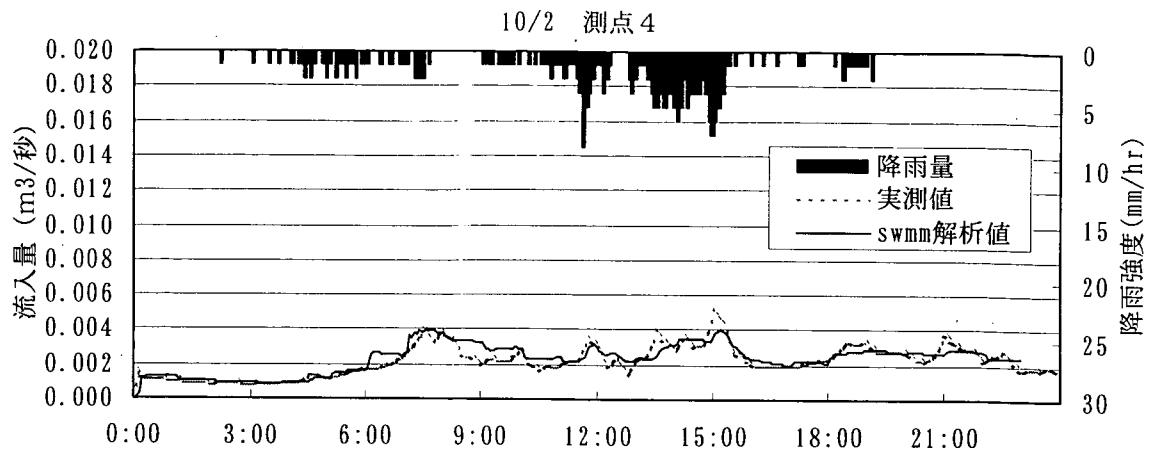


図4-17 U市シミュレーション結果(ケース2)その2

#### 4-5 改善対策実行後の再評価

K市では、浸入水対策工事後の実測調査が行われているため、このデータを用いて流出解析モデルを用いた検証を行った。

##### (1) 検討内容

K市では、対象流域の改善効果把握のために、約1年間をかけて5段階で補修工事を行い、その改善効果把握のため実測調査を行っている。改善効果については、2章で把握を行っているため、その改善効果の定量化を流出解析モデル”XP-SWMM”を用いて行う。

検証方法は、各補修段階での浸入水率の調査結果を不浸透域に反映させ、その他の解析定数については補修前のものを用い、解析を行うことで実測値を再現できるかを見るものとする。

なお、5分データ降雨量に欠測期間(1999.10.7から2000.3.4)があるため、4段階目の改善(接続ます+管開削交換、未使用管閉鎖後)と5段階目の改善(排水設備改良後)について検証を行うものとする。

##### (2) 解析定数の設定

解析定数については、前節で検討された降雨強度による使い分けを行うものとし、すべての降雨を両方の設定値で解析を行い、評価を行った。なお、浸入水率の設定は、市営住宅屋上の5分データ降雨量と1分ピッチの管内水量データを用いて算出した。

表 4 - 8 浸入水率

対策	日付	5分データ 降雨量 (mm)	1分データ 浸入水量(m3)	浸入水率 (%)	平均浸入水率 (%)
対策 4	00/3/4	36	23.93	2.87	2.5
	00/3/16	31	17.44	2.42	
	00/3/23	9	4.32	2.07	
対策 5	00/5/20	11	4.95	1.94	2.0
	00/5/27	18	10.36	2.48	
	00/5/31	26	9.04	1.50	

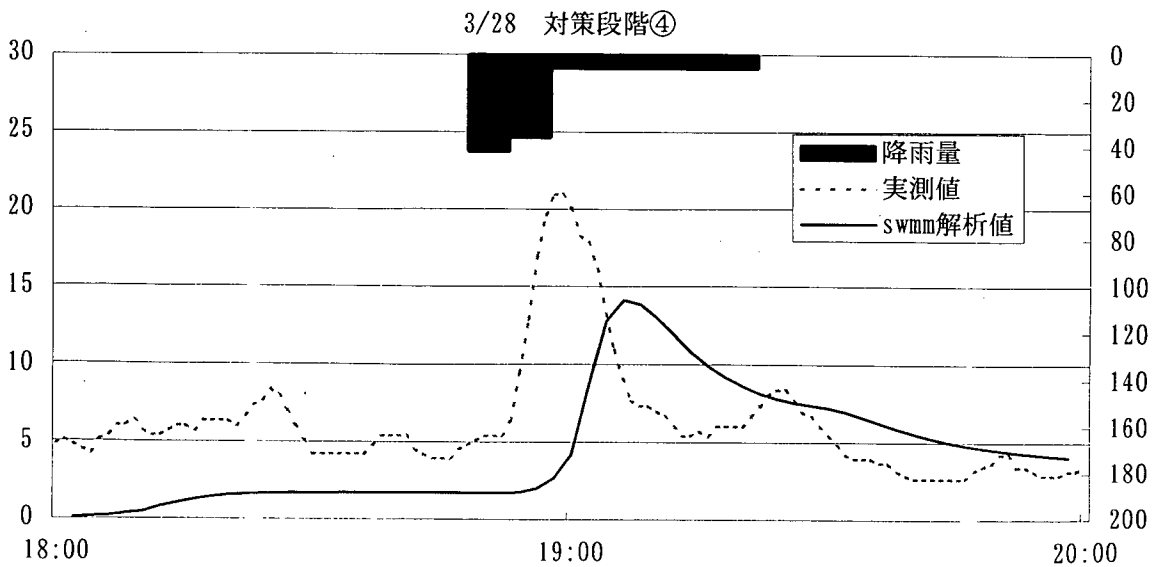
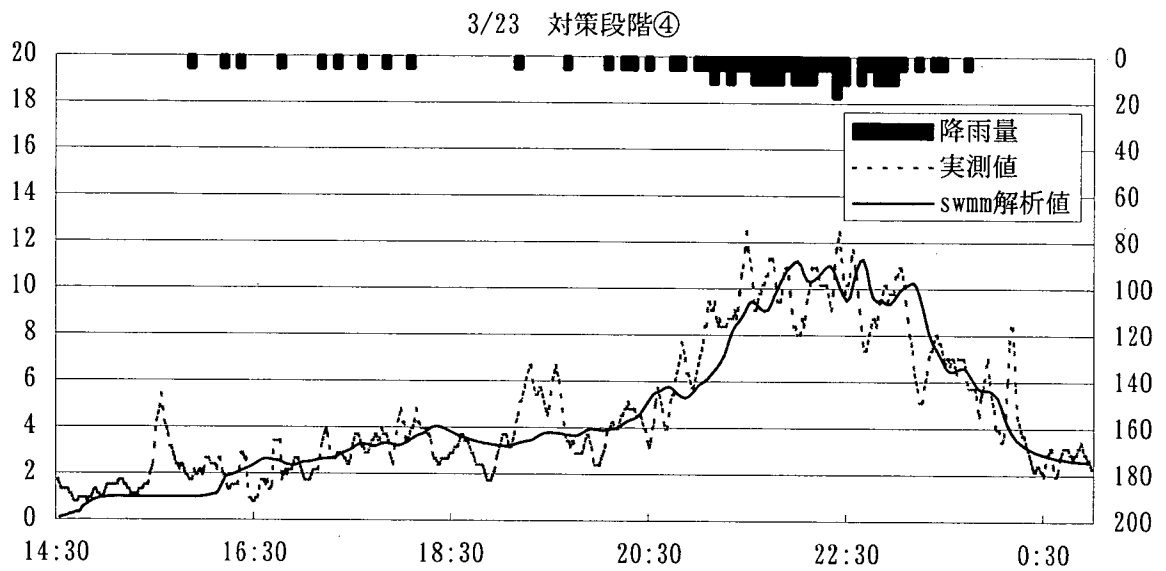
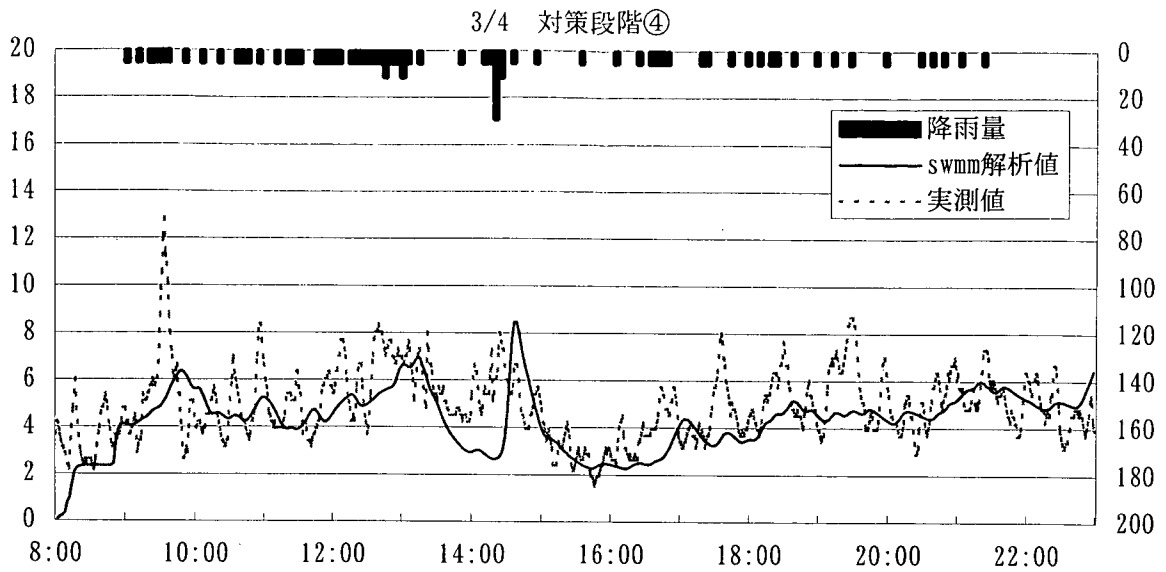
表 4 - 9 流量のシミュレーション条件の初期設定

項 目		設定値 1 (強い降雨強度) (図 4 - 2 1、2 2)	設定値 2 (弱い降雨強度) (図 4 - 2 3、2 4)	摘要	
流量	解析対象管きよ	全管網	全管網	対象流域が 2.5ha と小さかったため	
	不浸透域率	各対策の平均浸入水 率を用いる	同左		
	流域幅	管渠密度を 50m/ha と設定	同左		
	流域勾配	0.032 流域の平均値	0.032 流域の平均値		
	凹地貯留深	浸透域	999.0 mm	999.0 mm	浸透域からの流出 がないように設定
		不浸透域	0 mm	0 mm	
	地表面粗度係数	浸透域	0.030	0.030	
		不浸透域	0.5	0.02	
	管きよ粗度係数	0.013	0.013		
	直接流出域率	0 %	0 %		
ホートン浸透能	初期	- mm/hr	- mm/hr		
	最終	- mm/hr	- mm/hr		

### (3) 評価

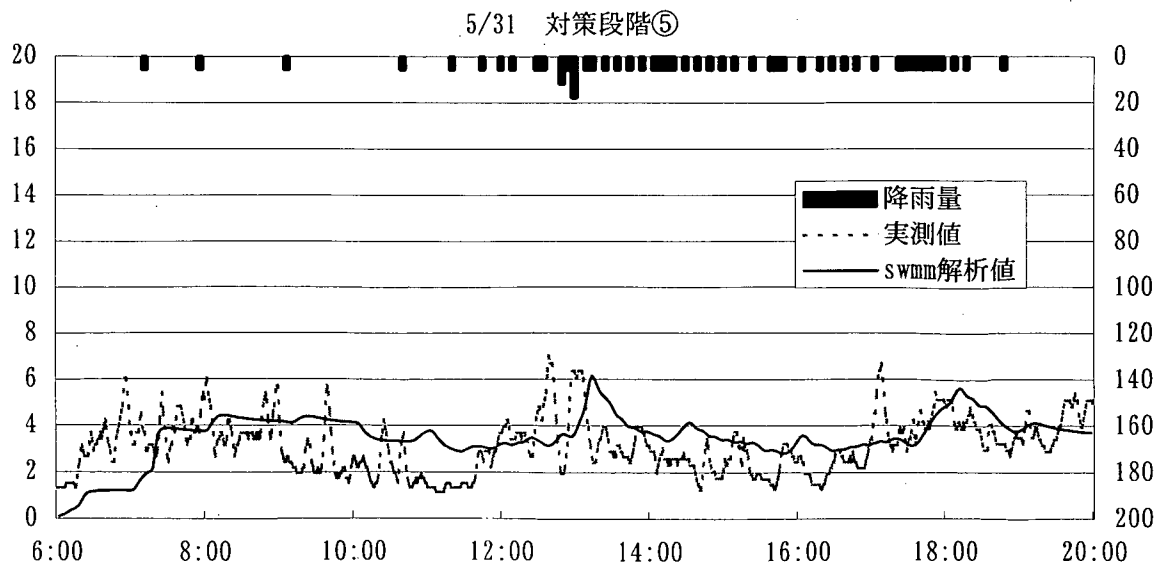
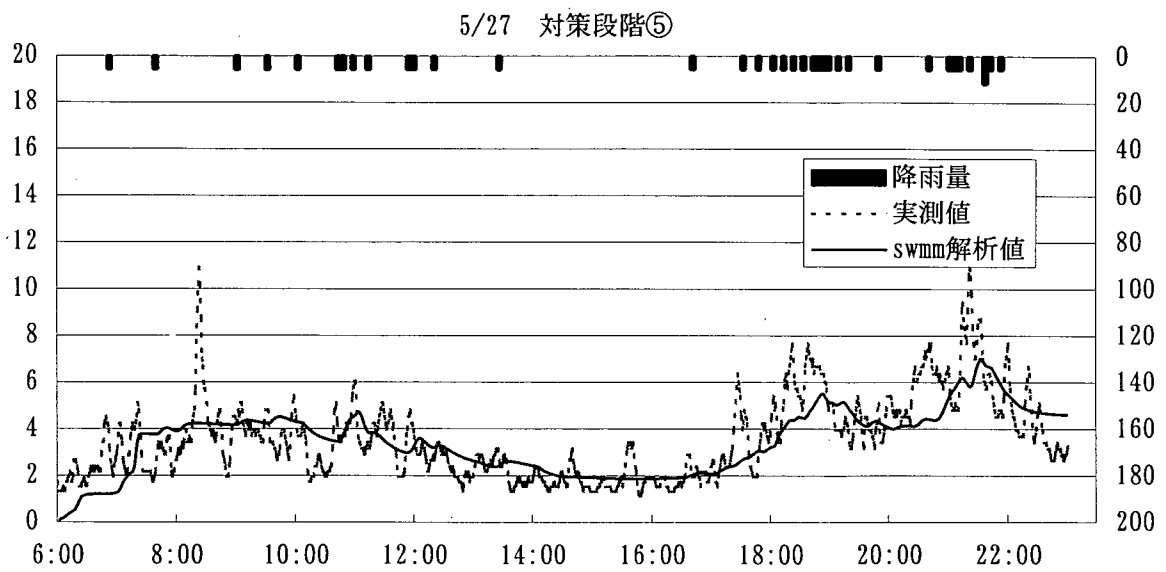
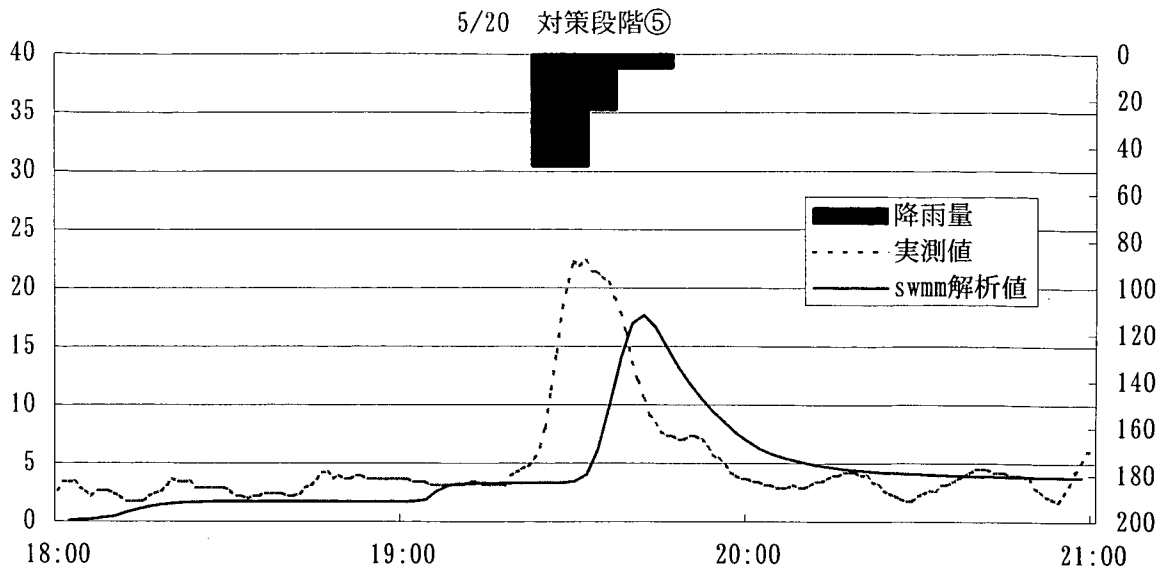
各ケース別の評価結果を図 4 - 1 8 ~ 2 1 に示す。

検討の結果、今回のように最大降雨強度 50mm/hr 以下の場合には、地表面粗度係数を 0.02 とする設定 2 の解析定数で、不浸透域率を実測値に合わせるだけで再現できることが分かった。



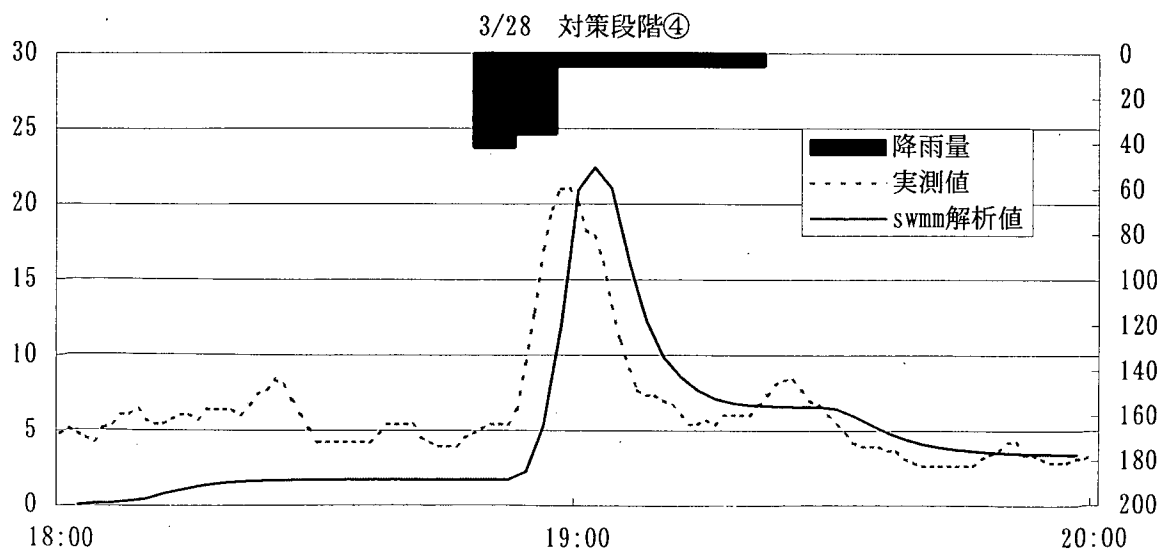
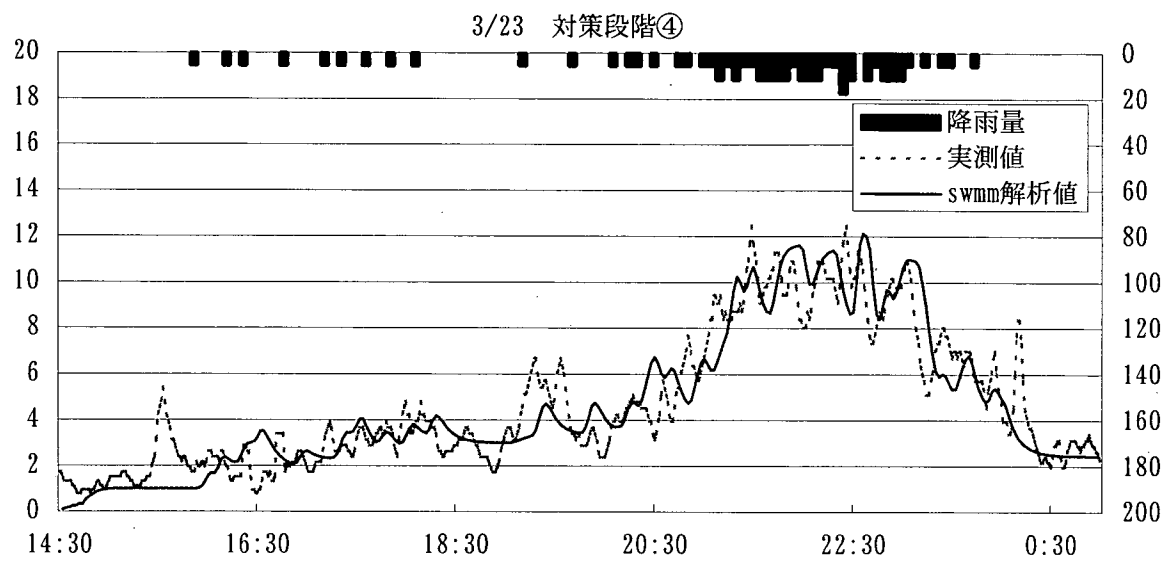
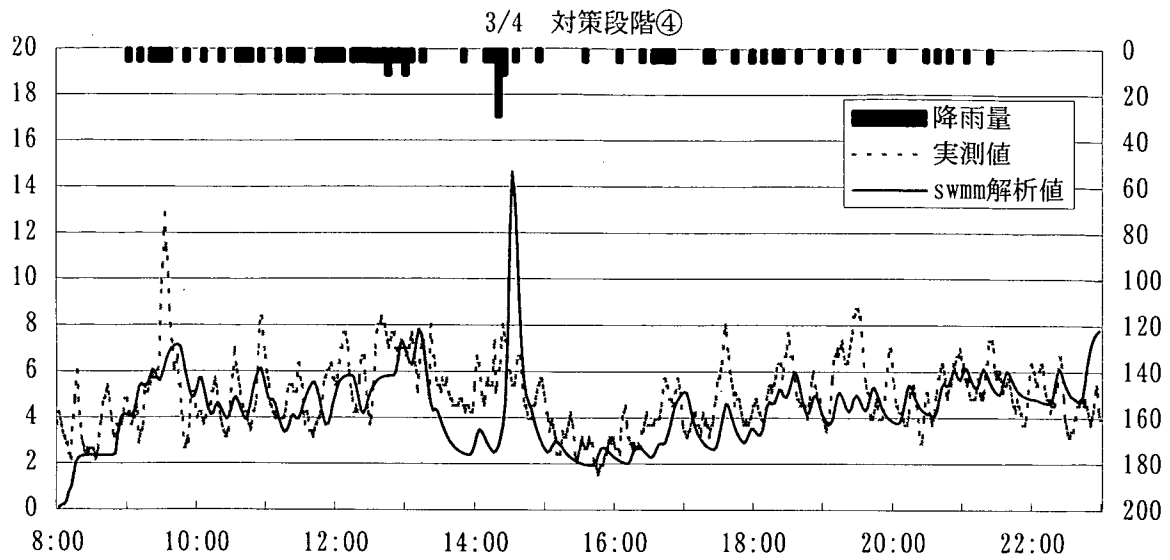
左縦軸 ; 流入水量 (m<sup>3</sup>/日)、右縦軸 ; 降雨強度(mm/hr)、横軸 ; 時刻

図4-18 K市改善対策実行後の再評価(設定値1)その1



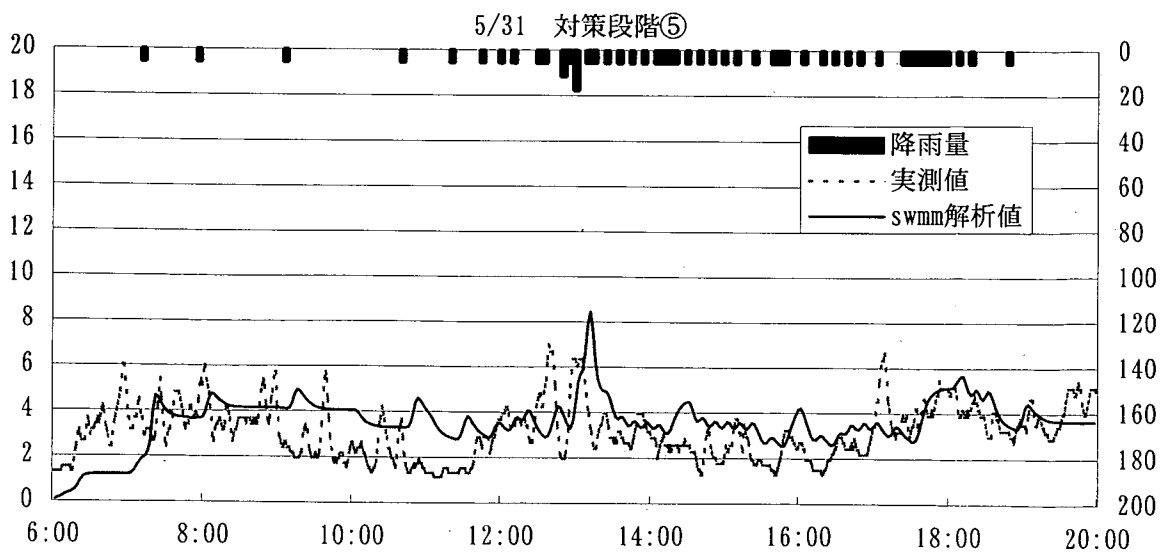
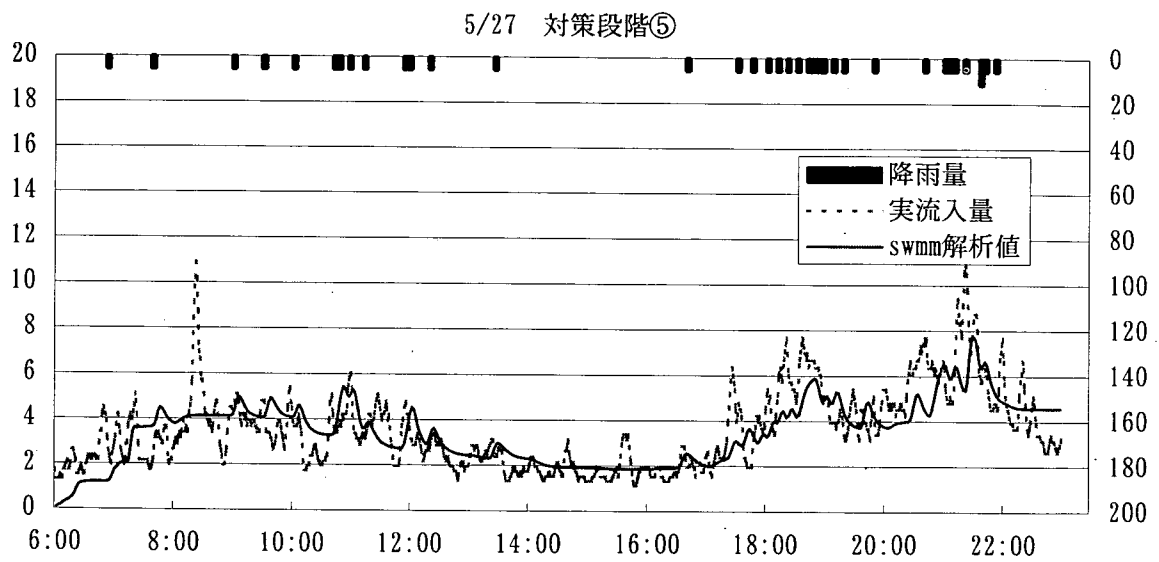
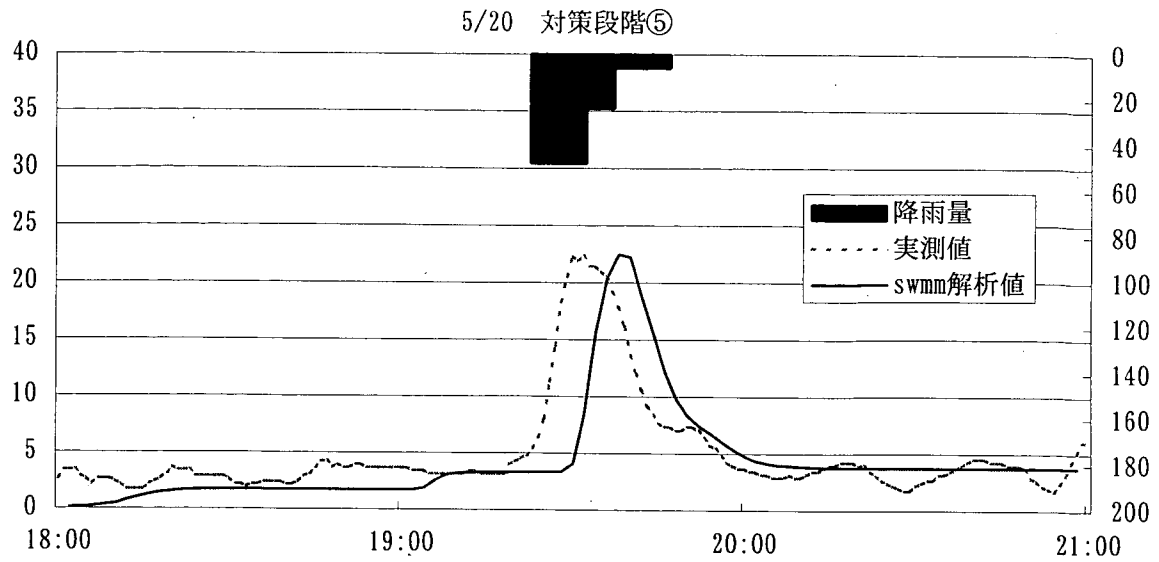
左縦軸 ; 流入水量 (m<sup>3</sup>/日)、右縦軸 ; 降雨強度(mm/hr)、横軸 ; 時刻

図4-19 K市改善対策実行後の再評価(設定値1)その1



左縦軸 ; 流入水量 (m<sup>3</sup>/日)、右縦軸 ; 降雨強度 (mm/hr)、横軸 ; 時刻

図4-20 K市改善対策実行後の再評価 (設定値2) その1



左縦軸 ; 流入水量 (m<sup>3</sup>/日)、右縦軸 ; 降雨強度(mm/hr)、横軸 ; 時刻

図4-21 K市改善対策実行後の再評価(設定値2)その2



## 4-6 結果と考察

### (1) パラメータ設定方法

今回の2流域の検討では、大きく考えて①総浸入水量、②ピーク・波形の2点を合わせることに注意してパラメータ設定を行った。結果から、次のようなパラメータ設定方法が考えられる。しかしながら、検討ケースが少ないため、今後は検討ケースを増やすとともに、他流域での検証も必要と考えられる。

#### ①総量

総量を合わせるために、今回の検討では次のようなパラメータ設定を行った。

##### ・不浸透域率

浸入水量を調整するため、実態調査で得られた浸入水率と不浸透域率を同一にする。不浸透域に降った雨は、全量が浸入水として管内に入るものと想定し、浸透域に降った雨はモデル系外へ流出し、管内に入っていないものとする。これにより、浸入水量の総量を合わせることができる。

##### ・窪地貯留深

不浸透域率で述べたように、不浸透域からの流出のみがあるものと想定しているため、浸透域の窪地貯留ですべての雨を貯留し、流出してこないようにするため窪地貯留深入力値の最大値である999mm/hrと設定する。また、不浸透域は、全量を流出するものとしてとらえるため、窪地貯留深は0mm/hrと設定した。

#### ②ピーク、波形

雨水や合流式下水道で一般に用いられるパラメータを用いて計算を行うと、解析値は実流量に比べて、ピークは大きく、波形は立ち上がりが急になってしまうことがある。これを合わせるために次のようなパラメータ設定を行った。

##### ・流域幅

流域幅を大きくすると管渠へ流入するまでの距離が短くなり、その他のパラメータを調整しても、流入状況の調整を図ることが出来ない。そこで、ある程度流域幅を小さく設定し、流入状況を調整できるような設定とすることが望ましい。これは、地表面に降った雨は、雨水渠には速やかに集まるが、今回の解析対象である污水管渠には、流入し難い構造となっており、地中を通して管内へ入るまでに多くのロスが発生するものと考え、この流域幅を小さくし、管渠までの延長を長く取るようにしている。

##### ・流域勾配

流域勾配については、今回の検討ケースではあまり影響しないため、流域の実態にあったものを設定する。これは、浸入水は地表面ではなく、地中を通して管内に侵入してくるため、地表面の勾配は影響しないものと考えられる。

##### ・地表面粗度係数

地表面に降った雨は、通常の雨水計画では速やかに管渠へ取り込まれる事から、不浸透域の地表面粗度係数は0.020程度が用いられるが、浸入水の場合には、一般的な雨水よりも地中等を通るロスが大きいため、この粗度係数による調整が有効で

ある。これは、一定以上の降雨が降った場合には、地表面に一時的に冠水した後、地表面に浸入するものと考えられることから、この冠水を地表面粗度係数で調整を行った。

## (2) 浸入水に対する対策とその効果についての評価方法

- ・小ブロックでの評価を行うことにより、そのパラメータや改善効果を用いて、全体区域や別ブロックの評価について定量評価することが可能となると考えられる。
- ・強い降雨強度の際のパラメータについて設定を行うことにより、計画降雨ハイトグラフや超過降雨ハイトグラフでの浸入水の挙動を定量評価することが可能である。

## (3) モデルを使用する際の注意事項

- ・モデル再現性の評価方法を検討する必要がある。
- ・今回のモデル化の方法では、1時間ピッチではなく、5～10分ピッチのデータが必要となるため、事前に実測調査が必要となる。
- ・降雨強度の違いにより、パラメータの設定を変える必要がある場合も考えられるため、実測調査の場合には、より多くのデータを取得できるようにする必要があり、特に、強い降雨強度の時にもデータが取れるように配慮する必要がある。これは、1降雨単位で浸入水率をみるとあまり差は現れないが、ピークの部分に着目すると弱い降雨強度の雨に比べ、強い降雨強度の際には、ある程度流入に遅れが発生する傾向にあるためである。この現象は、地中層を通過し管内に流れ込む浸入水が、強い降雨強度の際には、ある一定の流入速度（浸透能）を越えたあたりから、一時的に地表面に滞水し、その後、地中を通して管内に浸入するためでないかと考えられる。
- ・流出解析モデルで浸入水の状況を再現するには、管内へ入る流入を通常の雨水解析に比べ遅らせる必要がある。そのため、流域幅を小さくして、地表面の粗度係数で調整できるようにすることが必要である。

## (4) 今後の課題

- ・今回のモデルにより、浸入水対策において重要となるピーク水量の再現を行うことができた。これにより、施設増強を行う際の設計に雨水流出解析モデルの適用ができるものと考えられる。施設増強としては、バイパス管の設置、ポンプ能力増強、貯留施設の設置等が考えられる。
- ・K市の結果から、降雨強度の違いにより浸入状況が変わることが予想されるが、データ数が少ないため、もっと多くの降雨で検証する必要があるとともに、他流域でもデータを取得し検証することが望ましい。
- ・今回の検証は、1日程度の降雨を対象としているが、2～3日連続する降雨では、降雨による速やかに入ってくる直接浸入水だけでなく、間接浸入水の比率が増えてくるが、これらの解析方法については、今回のモデル化で再現することは困難であるため、今後長期間連続する降雨の解析方法について検討する必要がある。