

都市域の雨天時汚濁流出解析におけるモデリングの視点

東京大学大学院工学系研究科
水環境制御研究センター
都市工学専攻 古米 弘明

1. 都市における水管理の視点
2. 都市における雨水流出モデル
3. 浸透・貯留施設を考慮した雨水流出解析
4. 都市ノンポイント汚染と汚濁流出解析
5. 都市流出モデル解析における展望



1. 都市における水管理: 5つの視点

- 「治水」: 安全・安心な生活と産業活動
都市水害への対策のあり方へ
- 「利水」: 給配水システム、排水・再生システム
効率的な水利用と再生水利用へ
- 「親水」: 水とのふれあい、新たな水空間
都市の水辺、水路の再認識へ
- 「水域生態系保全」: 環境収容力保全
健やかさ、潤い、豊かさの向上へ
- 「水を介した熱管理」: ヒートアイランド対策
快適さ、すがすがしさの確保へ

東京の水収支

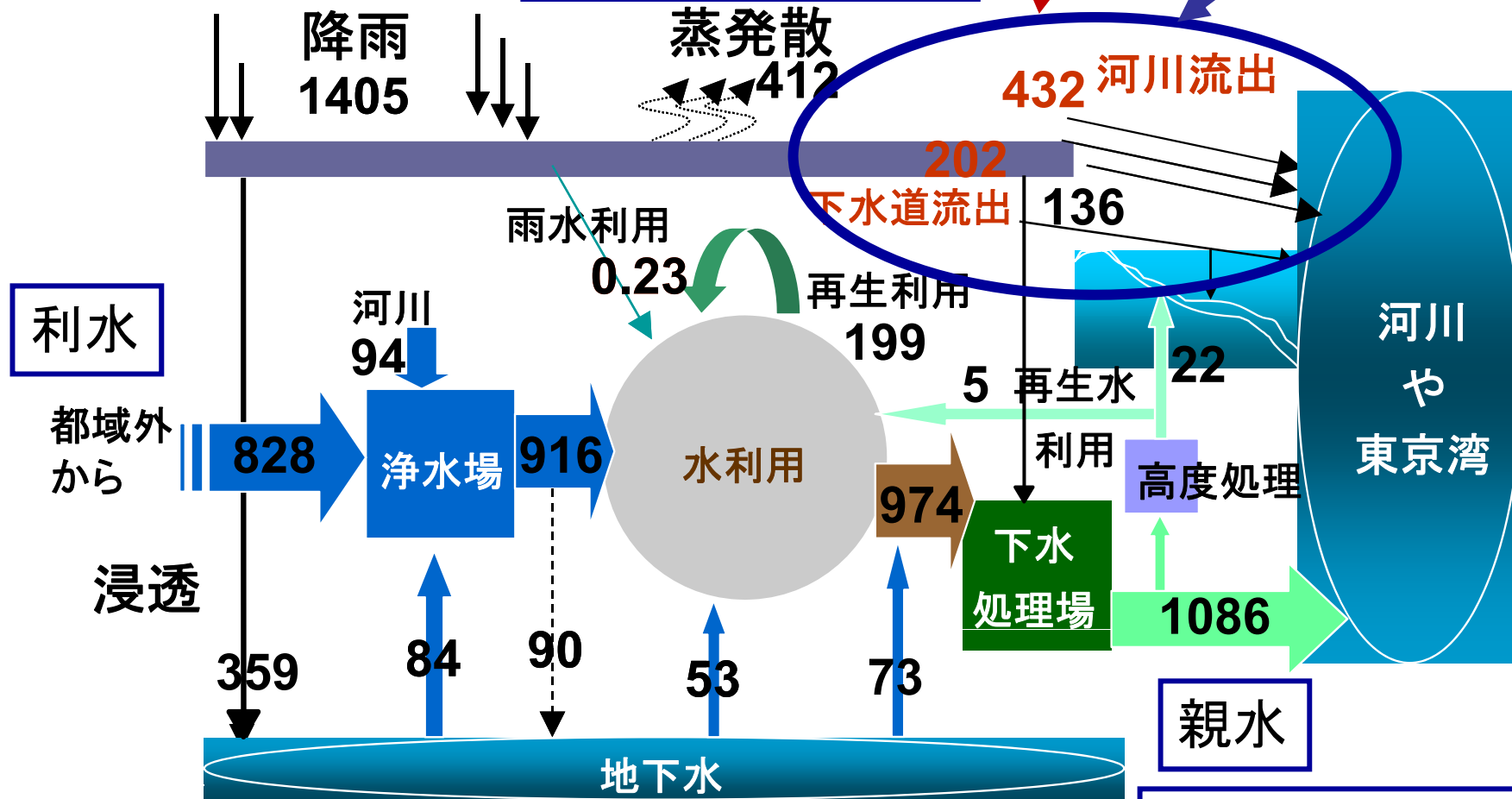
市街地排水の管理
CSOの管理

治水

水を介した熱管理

安全・安心な生活と産業活動
都市水害への効率的な対策へ

unit=mm/year



利水

都域外から

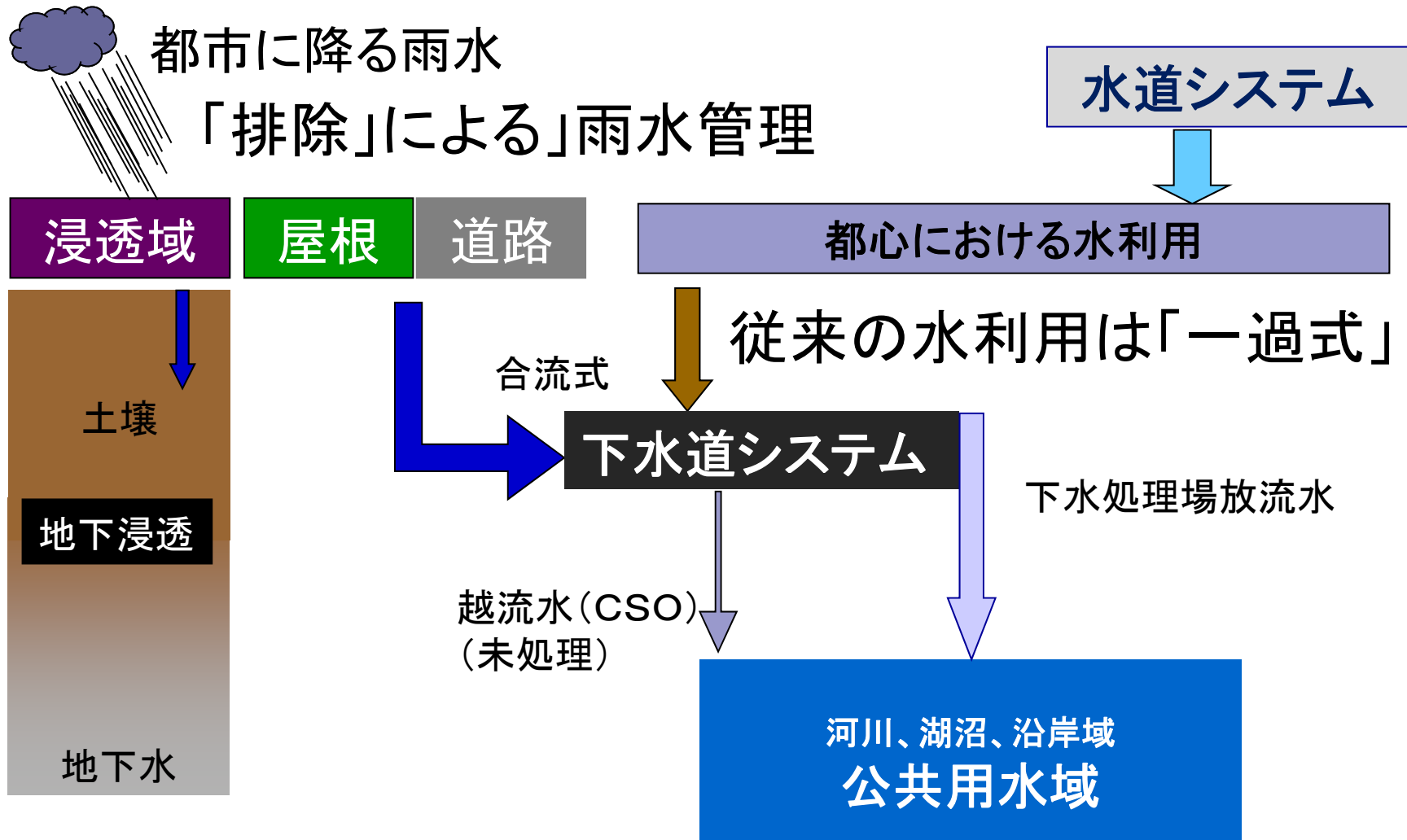
浸透

河川
や
東京湾

親水

水域生態系保全

都市域の雨水と汚水の流れ



2. 都市における雨水流出モデル

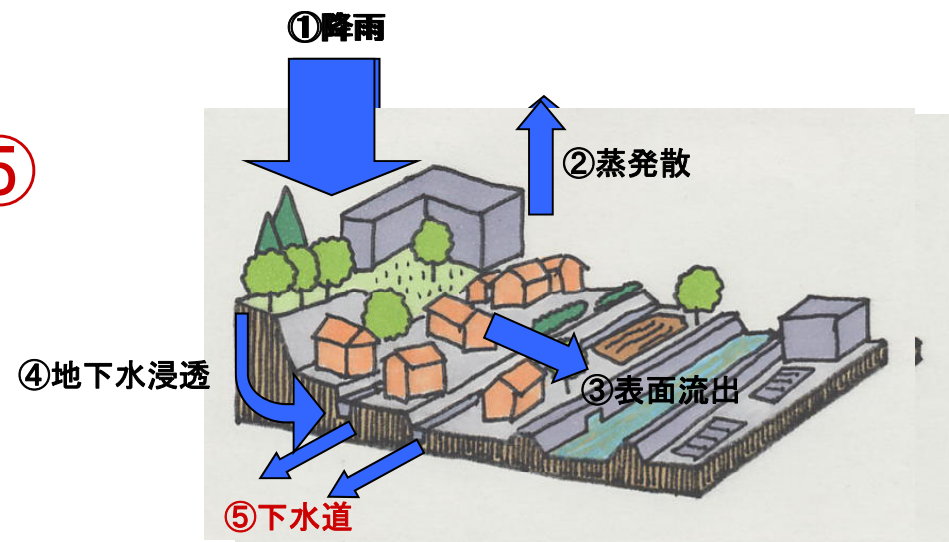
“水文・流出の素過程”


- 降水が地表面に到達する過程①
- 地表面から大気への蒸発する過程②
- 地表面を流出する過程③
- 地下に浸透する過程④

下水道への流入する過程⑤

地表面凹地に貯留する過程
施設に貯留する過程
河川への流出する過程
道路へ溢水する過程

都市域の雨水流出メカニズム





流出解析モデル利活用マニュアル

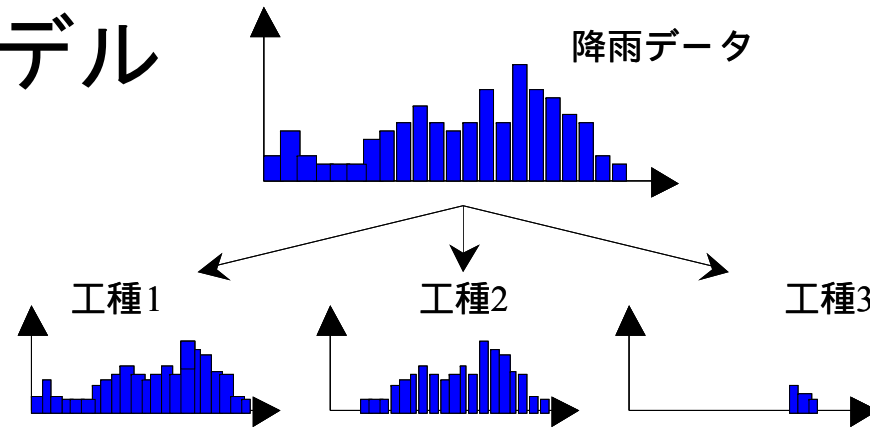
(雨水対策における流出解析モデルの運用手引き)

- **1999年3月に発刊**: 我が国における海外流出解析モデルの活用方法を明らかにする。効率的かつ効果的な雨水対策の立案・検証等に利活用されることを目指して、必要なデータの利用方法、モデル運用の際の基本的な考え方や留意事項。
- **2003年6月に改訂**: 流出解析モデルの機能向上や利用実績を踏まえた知見を反映した内容充実。流域管理の視点に立った下水道と河川の統合解析の記述、適用範囲の拡大を。
- **2006年3月に再改訂**: 平成16年度実施の全国自治体アンケート調査に基づき、さらに内容を充実。浸水シミュレーションに必要な氾濫解析、合流式下水道改善事業に伴う質解析、浸透施設などモデル化など、多種多様な適用事例を応用編に刷新。

流出解析のサブモデル

有効降雨(降雨損失)モデル:

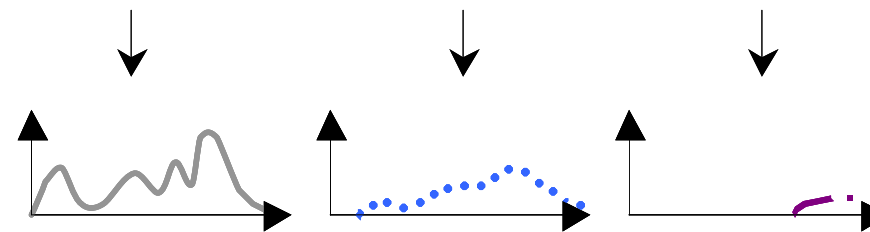
管路に流入する降雨量算定
窪地貯留損失、浸透損失、
流出係数



有効降雨
モデル

地表面流出モデル:

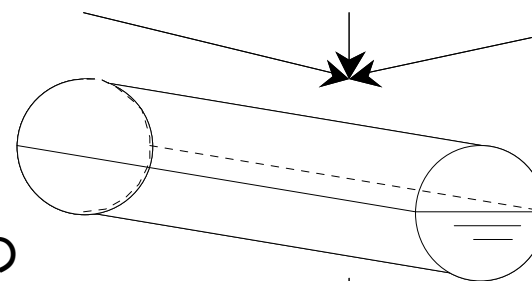
降雨が地表面を流出して、管路
への流入ハイドログラフ算定
時間面積法(タイムエリア法)、
非線形貯留法、二重線形貯留法



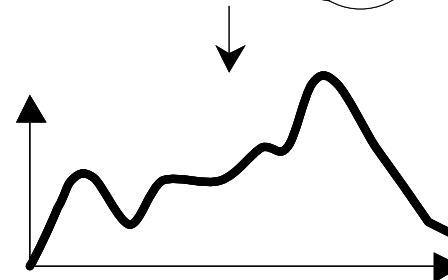
地表面流出
モデル

管内水理モデル:

管路内の流れを不定流計算するモデル
全サンプナン式(開水路の不定流計算の
基本式)、プライスマンスロット(管路の上
部に仮想的なスロット)
圧力を水位で計算して、地表面への流出



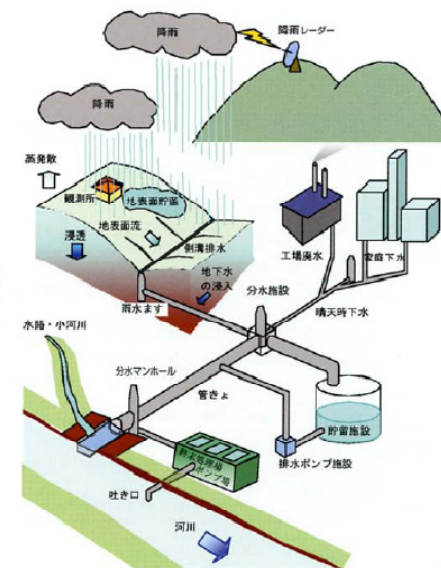
管内水理
モデル



ハイドログラフ

流出モデル解析におけるポイント

- 地表面特性や降雨の分布を考慮
- 複雑な管渠の接続、構造物を考慮
- 背水や逆流を含む厳密な水理計算
- リアルタイムで動的解析
 - 静的/動的な制御装置、開水路や幹線管渠
- 多地点同時解析
 - 管網の平面図、縦断図の中で、出水、満管状態、貯留、流下方向などの表示
- シナリオ分析の簡便性
 - 地表面特性変化、追加対策施設の取り込み



降雨データ
地表面・土地利用データ
管路やマンホールなどの
ポンプやゲート施設
施設運転管理データ
浸透、貯留施設
河川などの放流先の水位

下水道管理台帳データ

039036	<u>038035</u>	<u>02100</u>	023461025	023461025	3
	Map No.	Node No.			
<u>25998.900</u>	<u>-180100.660</u>	01480000	001359000	03300	
	X coordinate,	Y coordinate			
<u>020011120207</u>	1.20	1.60	01002	01	02 120200
	Drainage basin No.				
<u>1142</u>	0	4 2 4	84 133	<u>450</u>	38 280 <u>48200</u> 101000
	G.L.			Width	Length
<u>10090</u>	90	<u>9970</u>	<u>1039036</u>	<u>1410000</u>	1430000
	U/S Inv. Lev.	D/S Inv. Lev.	D/S Map No.	D/S Node No.	
0,347 820	100101100101	100101	000		



Manhole: Node No., XY coordinates, Grand Level

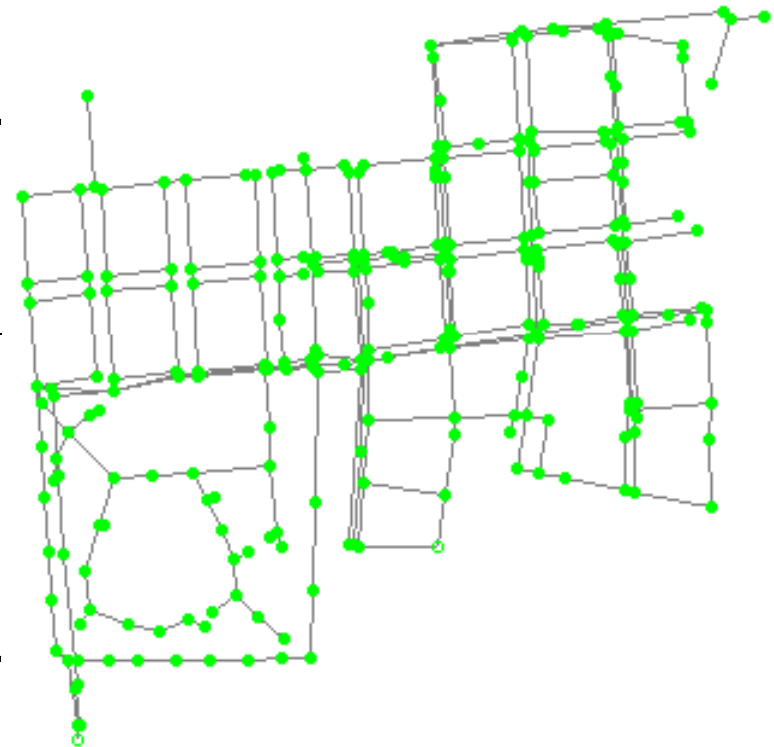
Conduit: Conduit No., Downstream Node No., Length, Width, Shape

下水道ネットワーク平面図

最低限必要なデータ項目

人孔 人孔番号,XY 座標,
地盤高,集水面積

管渠 下水管番号,下流端人孔番号,
管長,管形,管径,
上流端インバートレベル,
下流端インバートレベル



細密数値情報(15種類の土地利用項目)

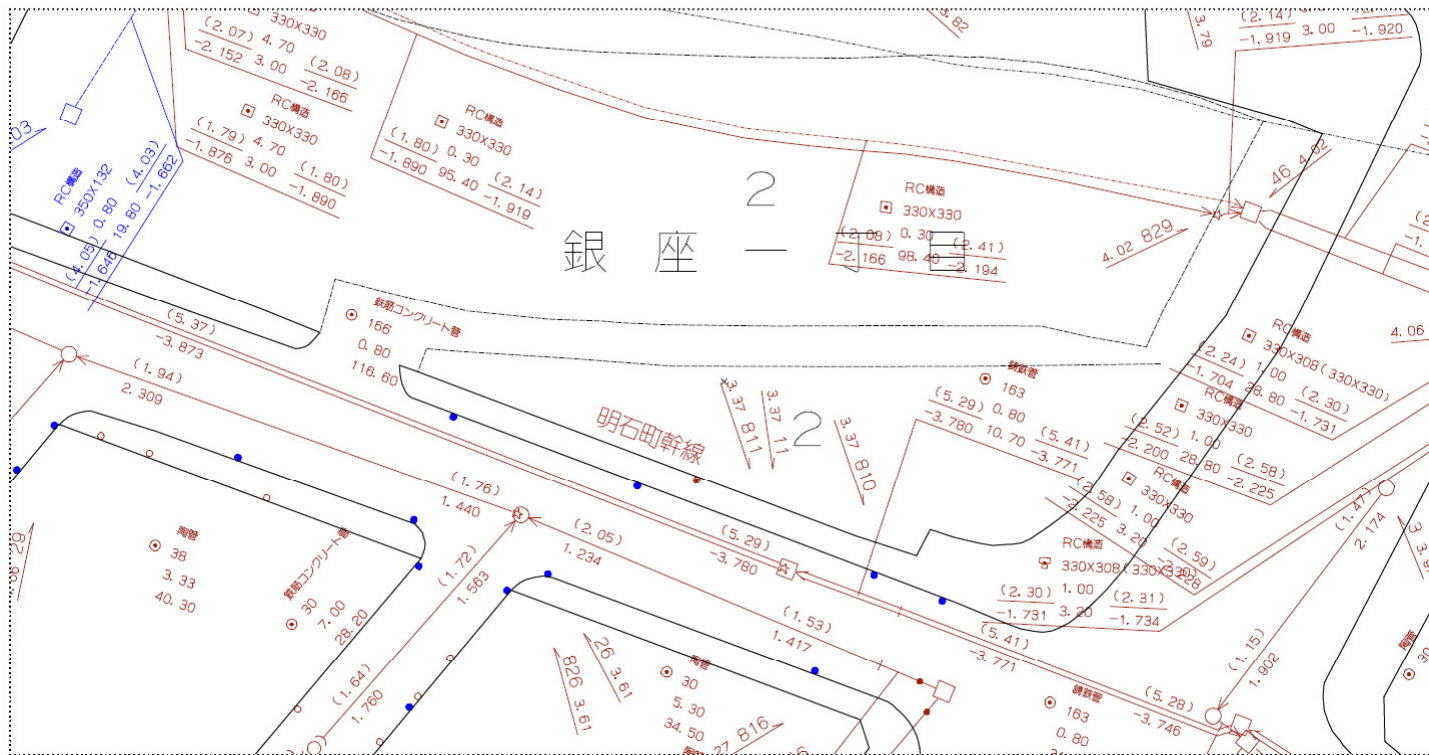
07110707070707070707 1108080808 11110707070707 11111111111111 10
07110707070707070707 06110808111107070707070707 1111111111 080810
07070707070707070707 0611081111070707070707 1111111111 08080808
07110707070707070707 061111070707 0505 1011111111111111 008080808
07110707070707 1111111111 0707 050505 1111111111111111 08080808 11
0707 1111111111 07 1212071111 130505 1111111111 10100711080808 1111
0707 11110707 1312121212 0711 131111111111 1010100707 11111111 0707
0707 1111070707 12121212 071111111111 101010101010 07111111 070707
0707 11110707 1212121212 1111111111 121212 131010 1111111111 070707
1111111111 07121212 111111111111 10121212121212 110808111111 0811
0707070707 1111111111111111 101111 1212121212 0211080808 11080808
0707070707 111111111111 070707 1111111111111111 080808 11110808
0909 10071111111111 0707070707 11070707070707 111111111111 0808
1009091111111111 070707070707 1107070707070707 1108080808 111111
101111111111 0707070707070707 1107070707070707 110808080808 1108
1111111111 1070707070707070707070707070707 110808080808 1108
111111 0707110707070707070707 11070707070707 1111111111 031111
1107070707 11070707070707070707 11070707070707 110707070707 1111
0707070707 11070707070707070707 110707070707 1111070707070707 11
0707070707 11070707070707070707 110707 10101010 110707 1212070707

- 1: 山林・荒地等
- 2: 田
- 3: 畑・その他の農地
- 4: 造成中地
- 5: 空地
- 6: 一般低層住宅地
- 7: 密集低層住宅地
- 8: 中高層住宅地
- 9: 工業用地
- 10: 商業・業務用地
- 11: 道路用地
- 12: 公園・緑地等
- 13: 公共公益施設用地
- 14: 河川・湖沼等
- 15: その他(防衛施設等)
- 16: 海
- 17: 対象地域外

東京都の下水道台帳情報システム SEMIS (SEwerage Mapping and Information System)

東京都公共下水道台帳 施設平面図 (A4・横)

縮尺 1 : 500 (プリンタによっては正しい縮尺で印刷されない場合があります)



印刷年月日: 2008年08月17日

下水道局では、できる限り最新で正確な情報の提供に努めておりますが、施設平面図は、現地を正確かつ詳細に測量したものではありません。また、下水道の工事や道路工事等が行われた場合、しばらくの間、図面と現地が整合しないことがあります。したがって、本図面を設計、工事等にご利用される際は、下水道施設の位置などを現地で調査・確認のうえ、ご利用ください。



東京都下水道局

3. 浸透・貯留施設を考慮した雨水流出解析

雨水流出抑制の分類

雨水貯留型: オンサイト施設とオフサイト施設

雨水浸透型: 浸透ます、トレンチ、透水性舗装など
土地利用の計画的な管理

都市計画中央審議会答申(平成7年7月18日)

「今後の下水道の整備と管理は、いかにあるべきか」

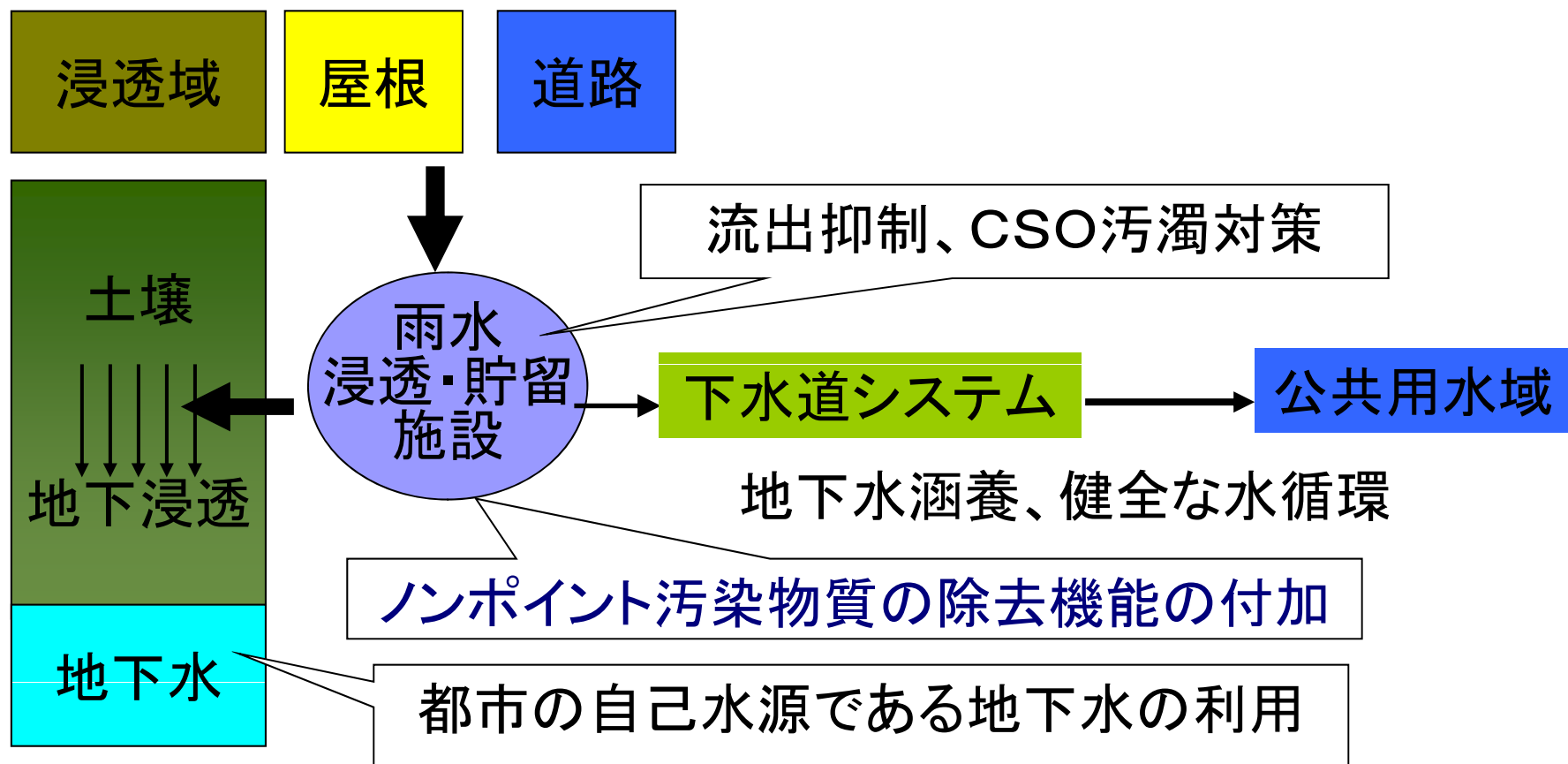
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/singikai/sn011.ht>

下水道の質的向上として、流域内での雨水貯留と浸透の複合的な効果への期待が述べられている。

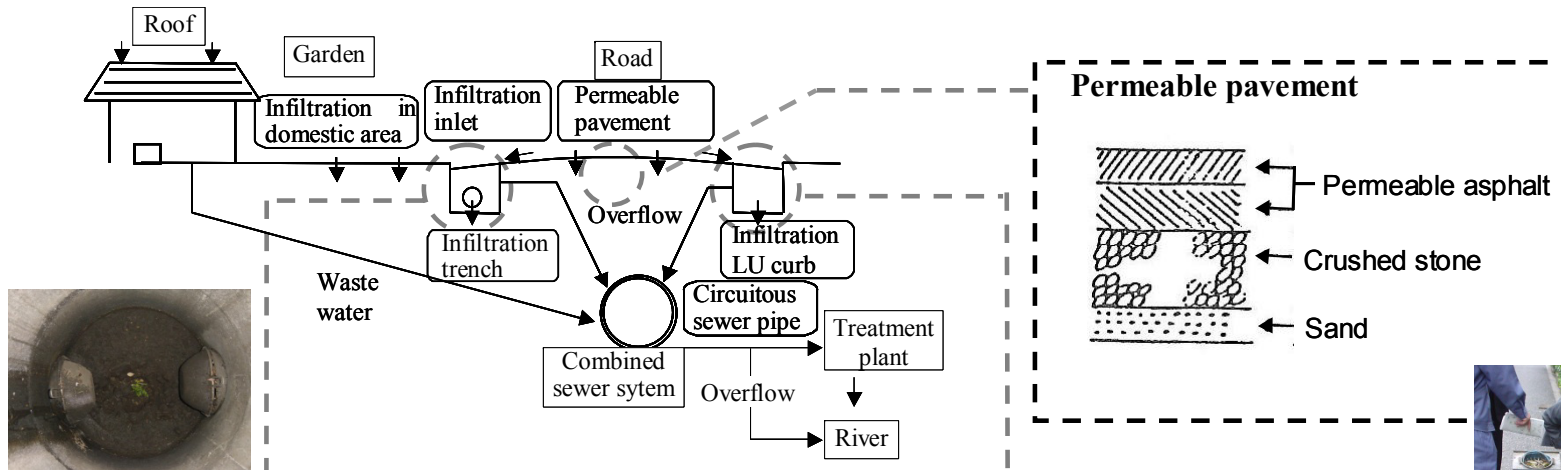
雨水浸透・貯留による

流出抑制・地下水涵養

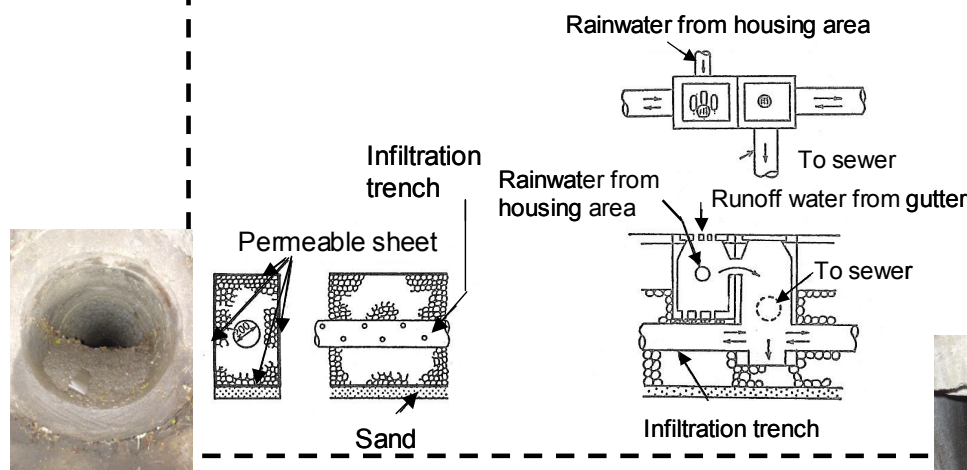
さらにノンポイント対策



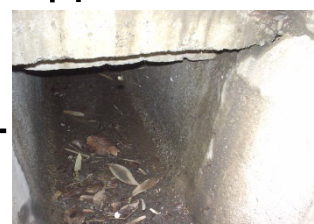
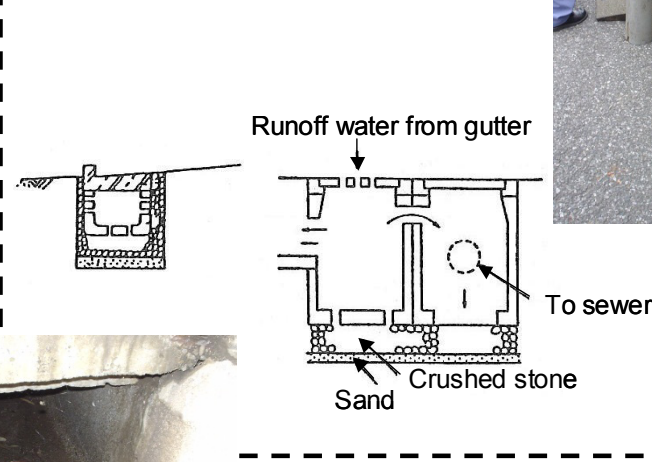
下水道雨水浸透施設の概念図



Infiltration inlet and trench

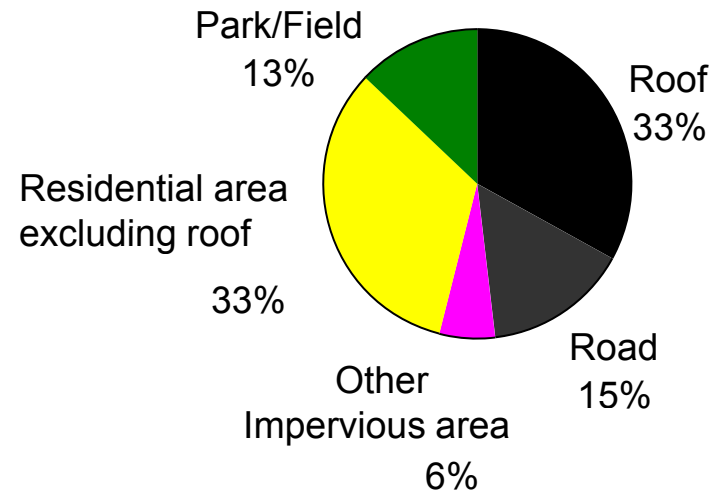
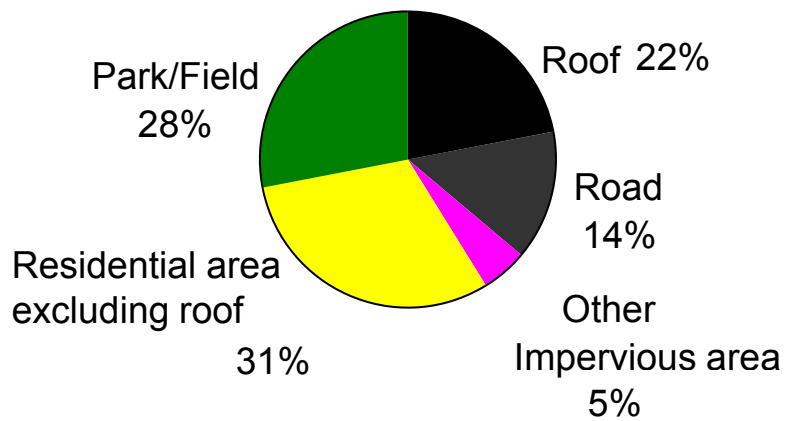
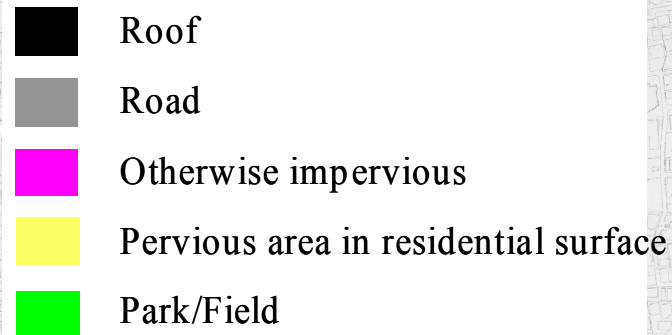
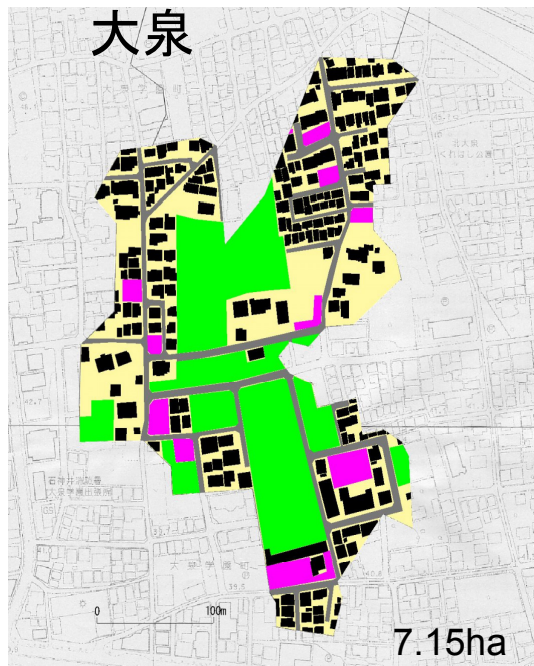


Infiltration LU curb



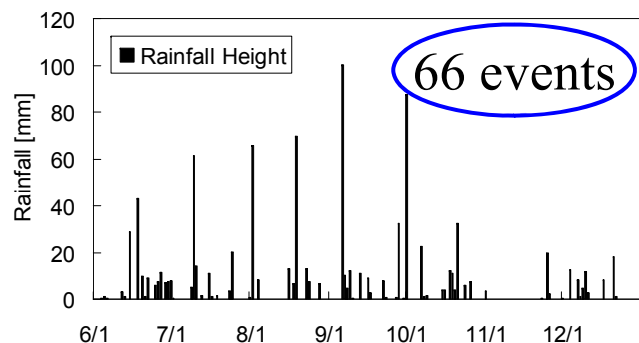


雨水流出抑制型 下水道 調査排水区



対象地域データ

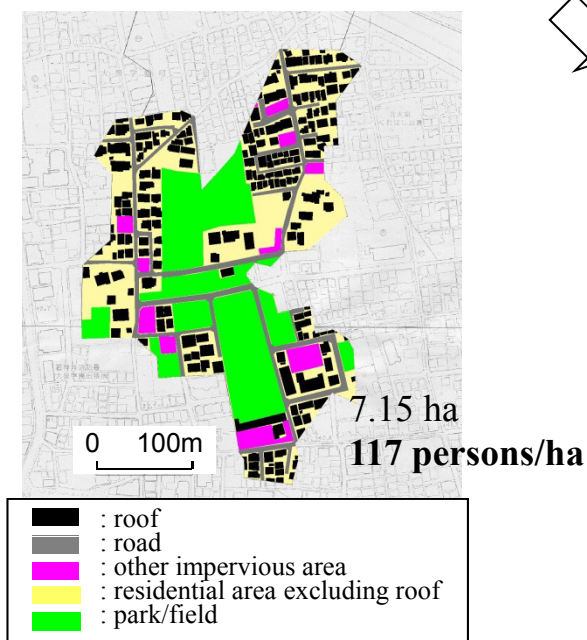
対象地域: 大泉学園



降雨データ

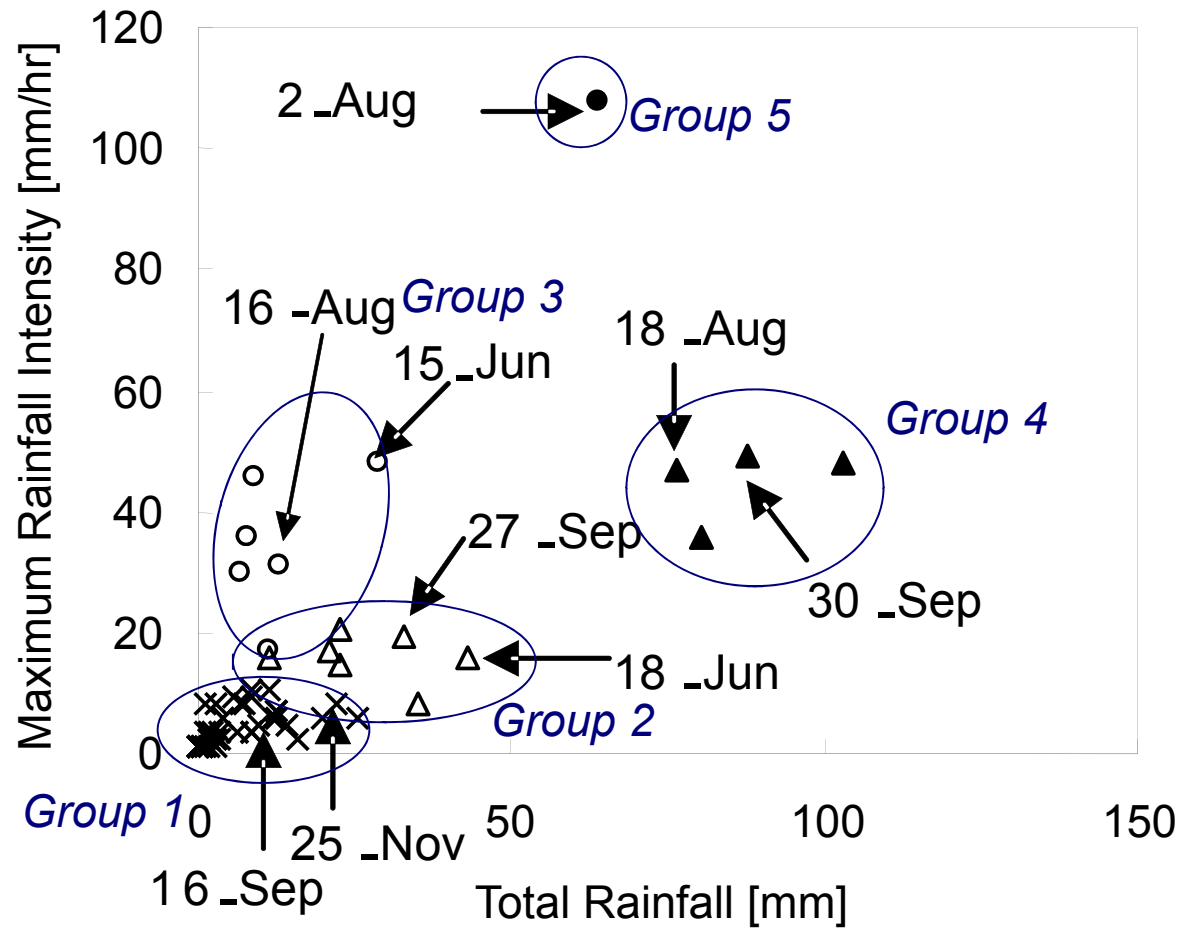
モニタリング期間: 5/30- 12/31/2002
降雨データは5分間隔、0.1mm単位

クラスター解析 (Ward Method)



	Number of events	降雨量 [mm]	最大降雨強度 [mm/hr]	平均降雨強度 [mm/hr]
Group 1	48	5.5	4.2	0.8
Group 2	7	26.9	15.8	2.1
Group 3	6	12.9	34.6	3.5
Group 4	4	86.9	45.0	2.9
Group 5	1	63.9	108	13.5

総降雨量と最大降雨強度による降雨分類



浸透施設の貯留・浸透パラメータ設定

	Manholes	Soakaways	Trench	LU curbs	Permeable pavement
Ooizumi:	64	129	0m	2568m	0.45ha
Shakujii:	111	300	2313m	0m	0.57ha

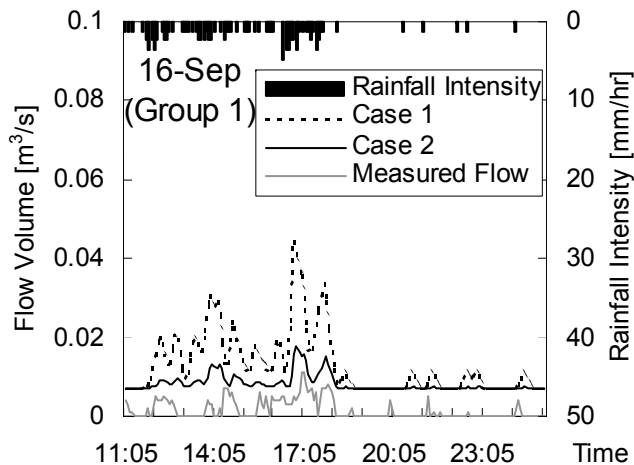
Ultimate infiltration rates and storage volume of infiltration facility

Types of facility	Infiltration rate	Storage volume
Permeable pavement	10mm/hr	2mm
LU curb	2.5L/min/m	0.09m ³ /m
Soakaways	3L/min/unit	0.108m ³ /unit
Trench	8L/min/m	0.0314m ³ /m



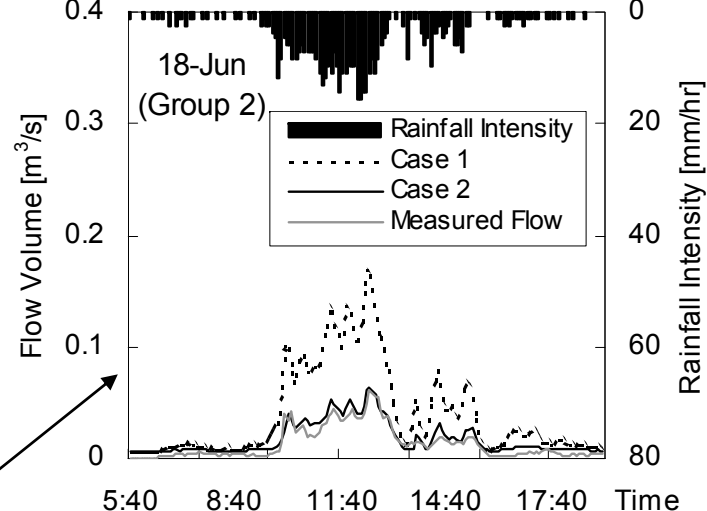
ハイドログラフの検証(弱い降雨)

TR:9.4mm MRI: 4.8mm/hr ARI: 0.71mm/hr



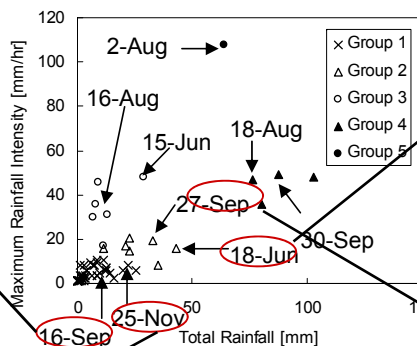
弱い小降雨
Group 1

TR: 43.3mm MRI: 15.6mm/hr ARI: 3.3mm/hr



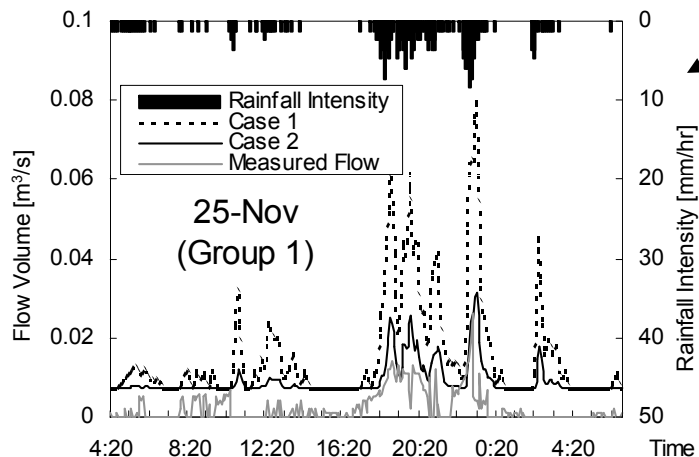
中小降雨 Group 2

Case1
点線: 浸透施設なし
Case2
実線: 浸透施設あり

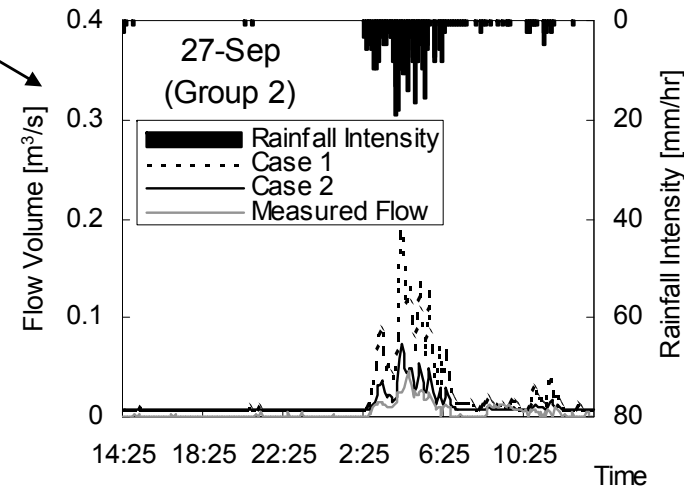


観測値とCase2(浸透施設考慮の解析結果)との整合性

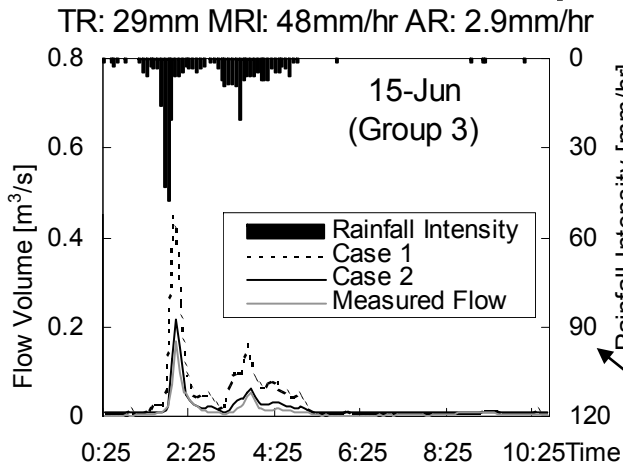
TR: 22.1mm MRI: 8.4mm/hr ARI: 0.85mm/hr



TR: 33.1mm MRI: 19.2mm/hr ARI: 1.5mm/hr

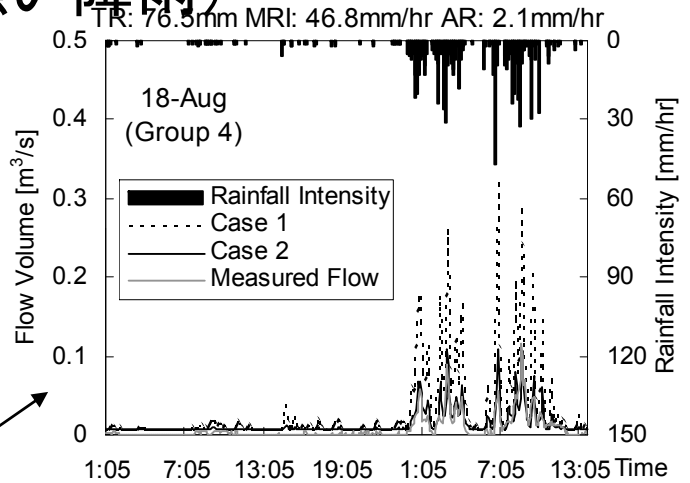


ハイドログラフの検証(強い降雨)

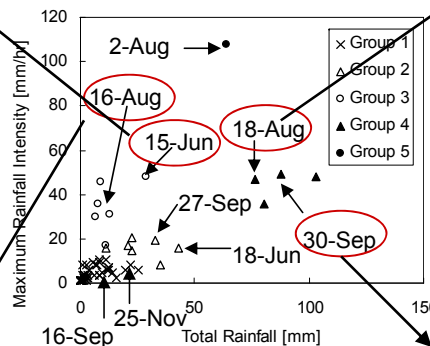


中小降雨 Group 3
一時的に強い降雨強度

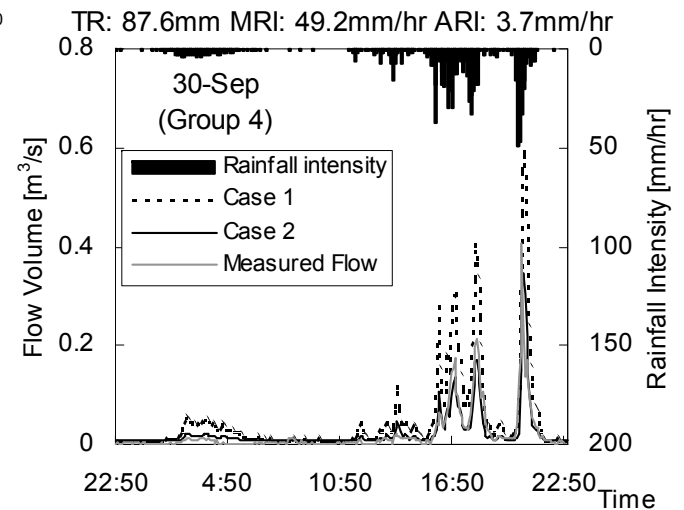
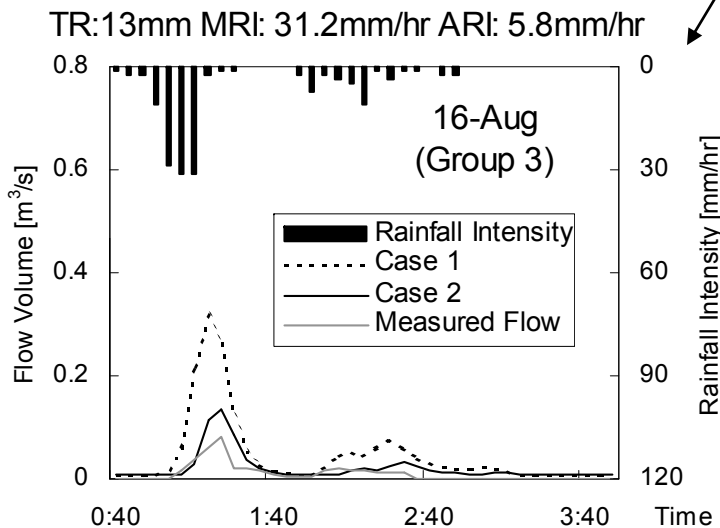
Case1
点線: 浸透施設なし
Case2
実線: 浸透施設あり



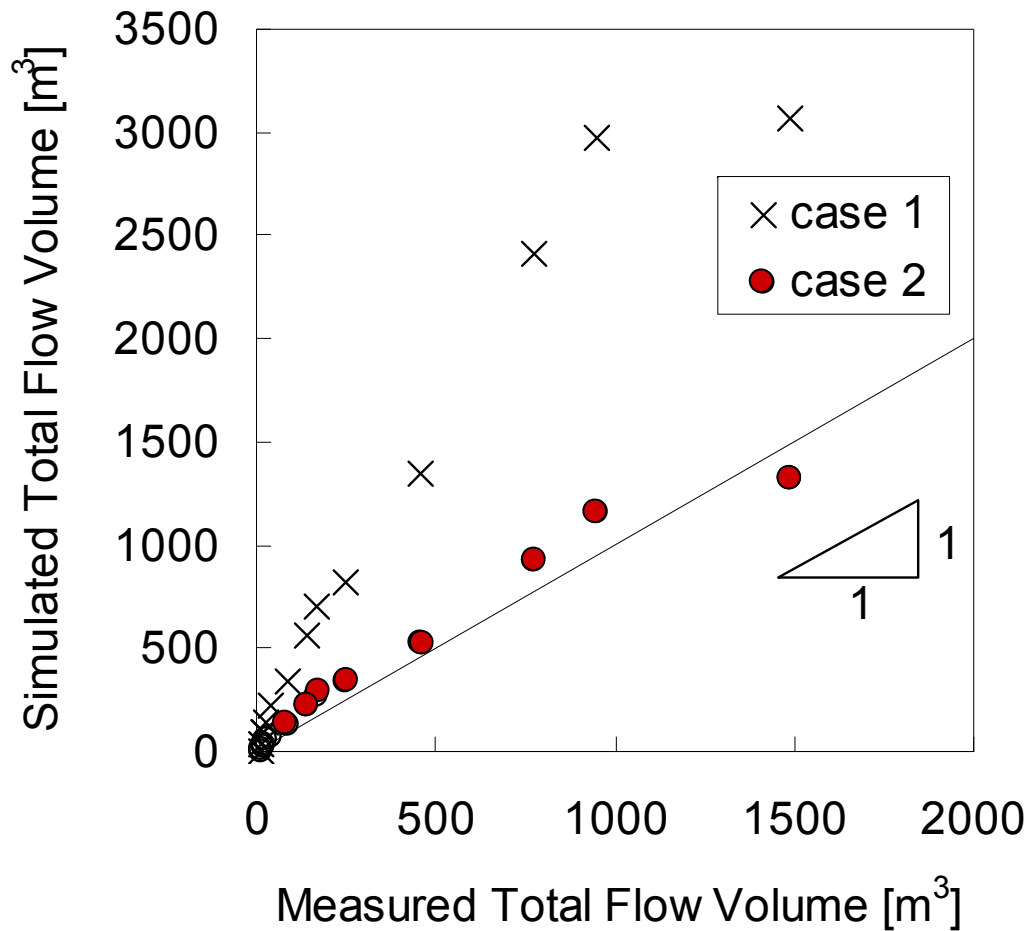
比較的大きな降雨
Group 4



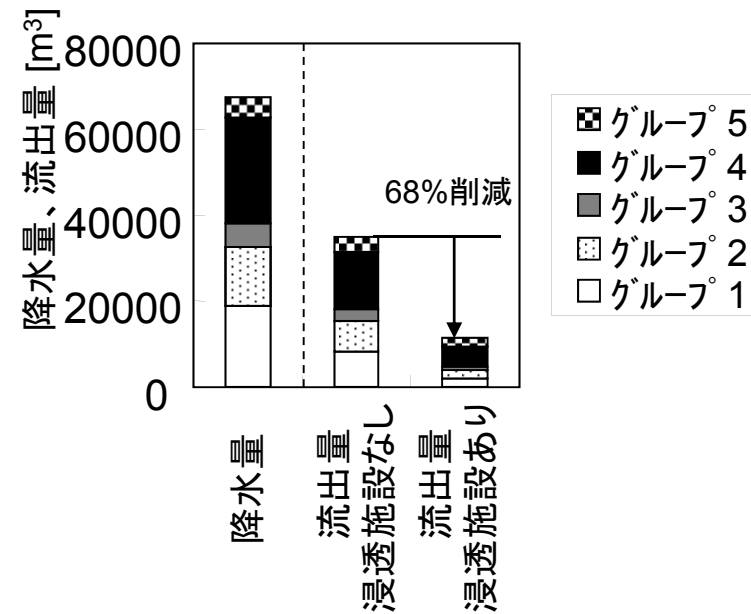
観測値とCase2(浸透施設考慮の解析結果)との整合性



実測および計算流出量の比較

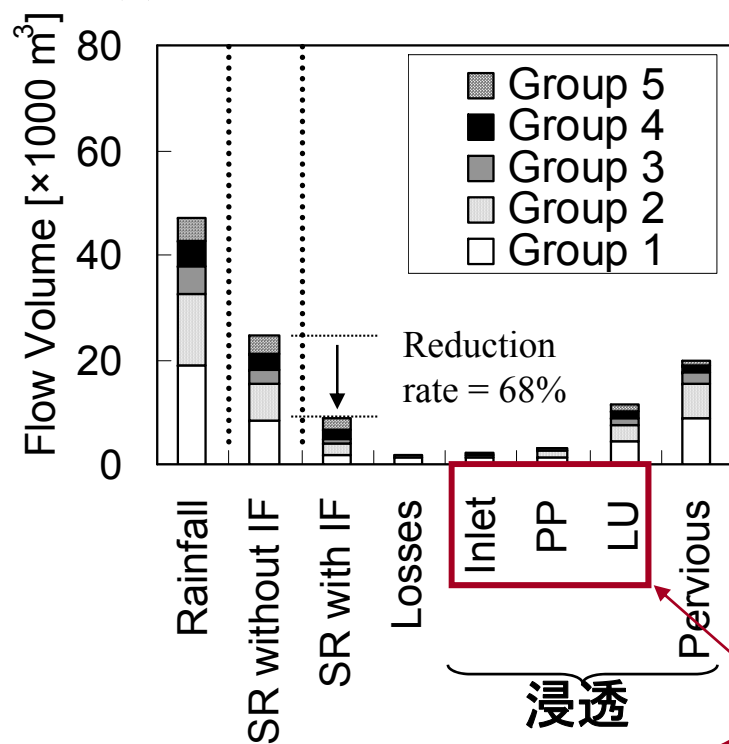


Case 1 : 浸透施設なし
Case 2 : 浸透施設あり

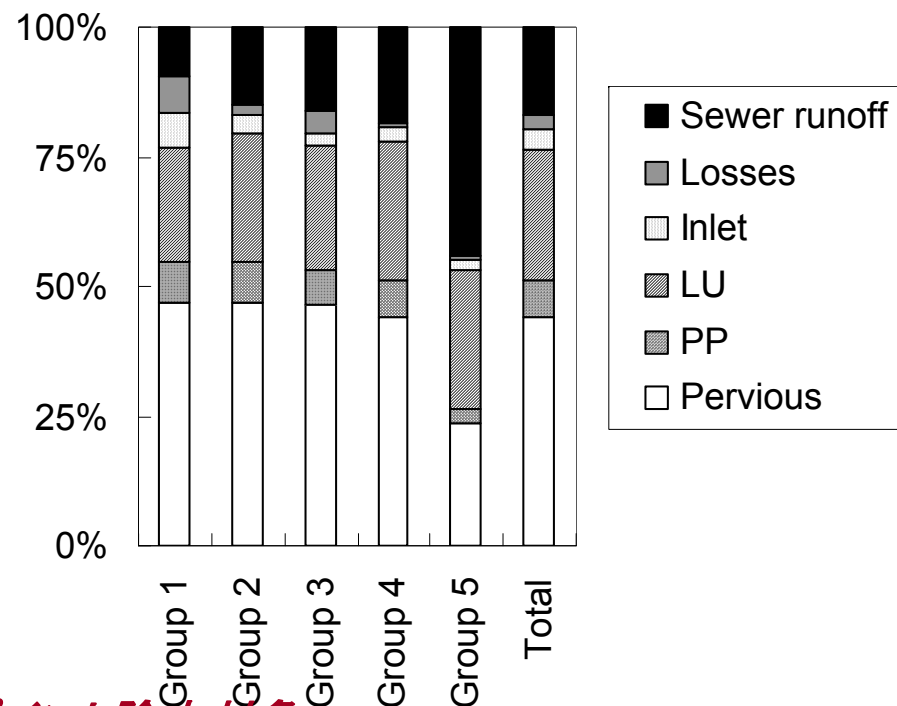


類型化された降雨パターンと水収支

(a) 累積雨水流出量の内訳



(b) 流出水の配分内訳

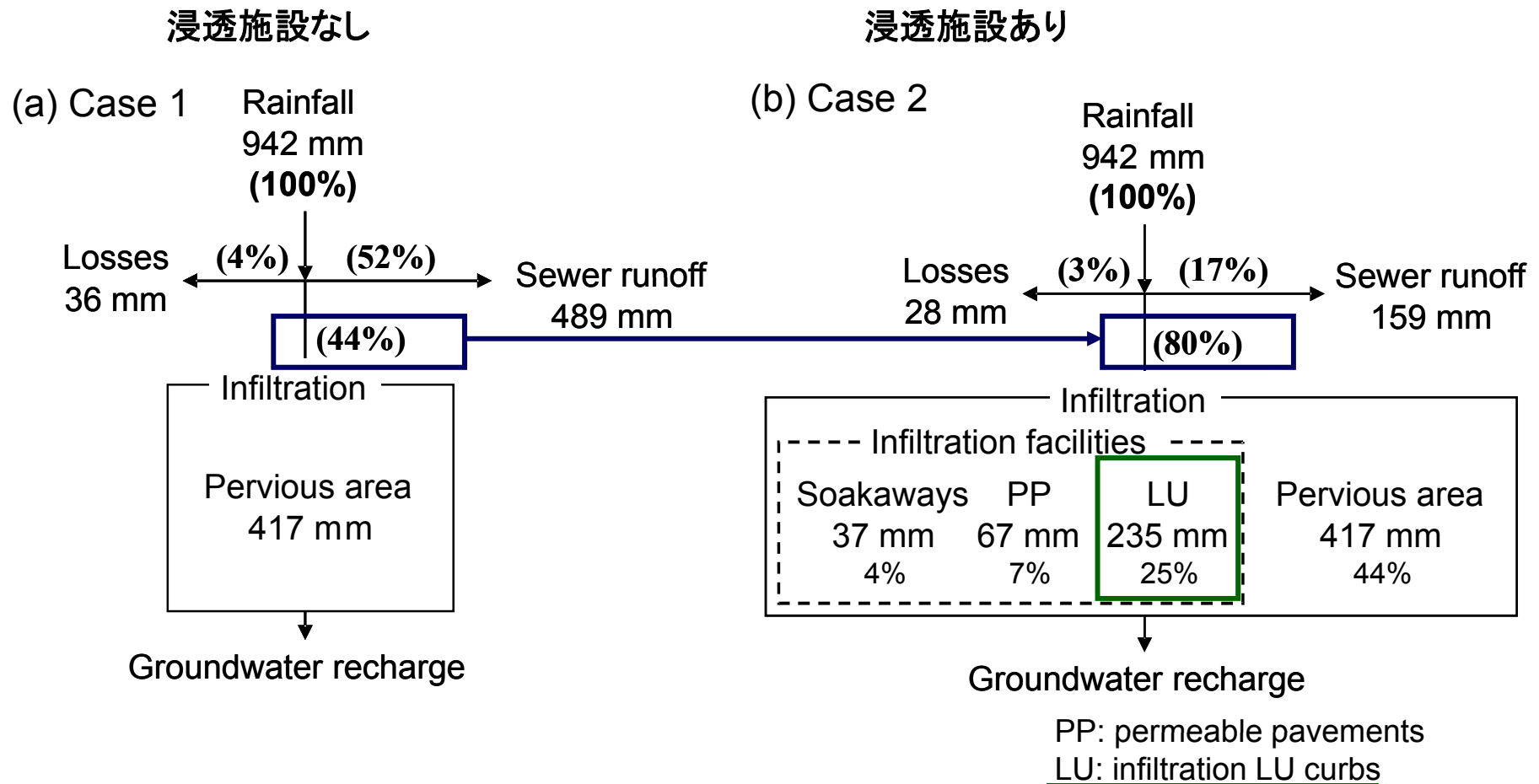


SR (sewer runoff) : the excess runoff to sewer pipes, Losses: losses on impervious area, inlet: infiltration inlets, PP: permeable pavements, LU: infiltration LU curbs, pervious: pervious areas

浸透施設による地下水涵養効果は浸透域からと同程度
浸透LUカーブからの寄与は降雨特性によらず大きい

都市雨水の流れと収支の評価

66降雨全体での水収支



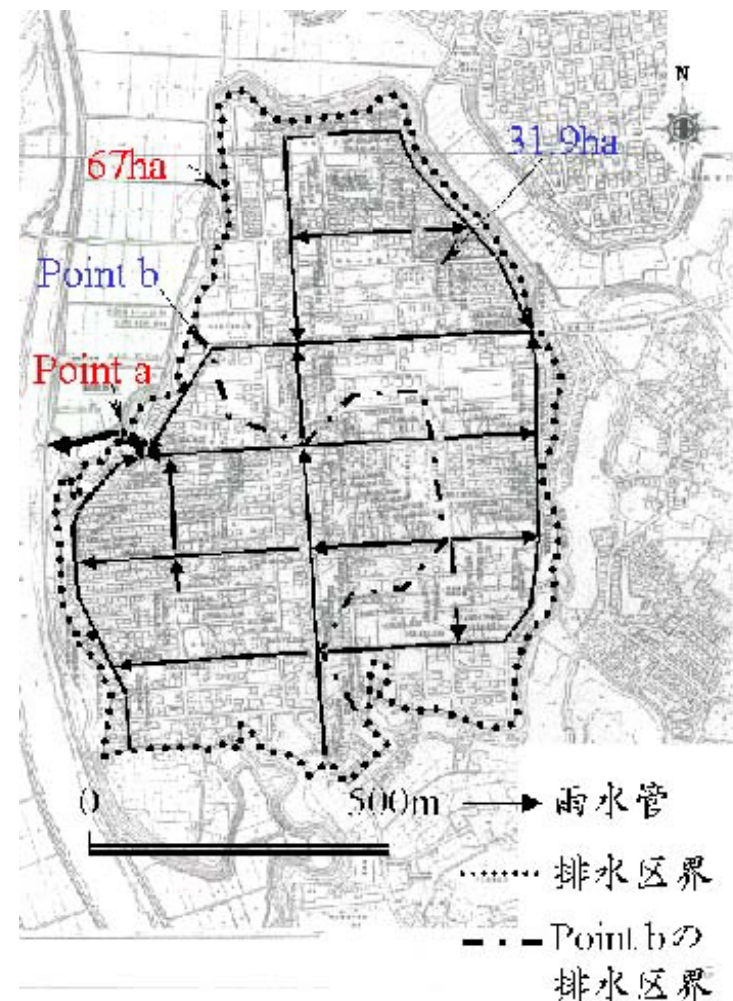
4. 都市ノンポイント汚染と汚濁流出解析

➤ 茨城県牛久市刈谷排水区 (分流式:67ha)

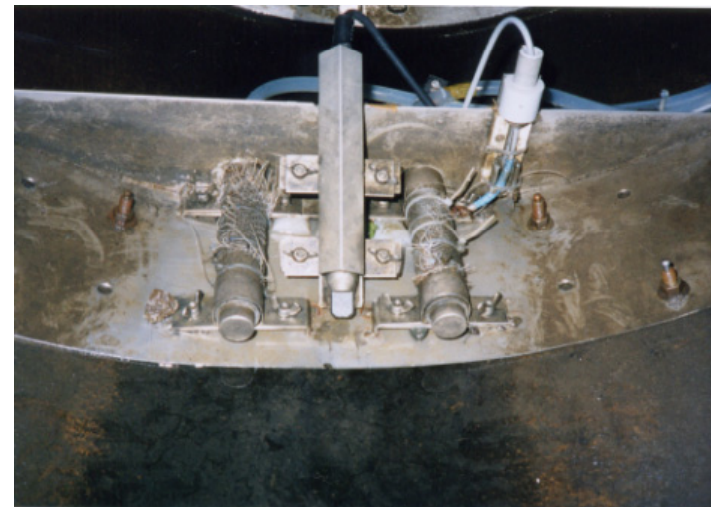
- ✓ 不浸透面積率約40%
- ✓ 住宅市街地
- ✓ 管渠数 158本

➤ 選定理由

- ✓ 既設の観測小屋が利用可能
- ✓ 新たに観測施設の設置が可能
- ✓ 細密数値情報が利用可能
- ✓ 短時間内(2-3時間)に現場に行くことが可能



採水装置設置場所 & 採水口



観測降雨の特性

Date	Rainfall Height	Maximum Rainfall Intensity*	Maximum Rainfall and Sampling Duration	Dry weather Period	Runoff Sampling	
	[mm]	[mm/hr]	[hours]	[days]	Point a	Point b
April 20	22.9(8.1)	13.2(6.0)	49.5(16.0)	3.7		
April 23	3.5	15.6	5.0	1.4	×	×
April 24	10.2	9.6	7.5	0.9		
April 26	19.5(9.0)	6.0(4.8)	20.5(8.0)	1.6		
April 27	15.9	114.0	7.0	0.5		
May 11	0.8	2.4	3.5	13.6	×	×
May 12	3.4	4.8	4.0	0.6		
May 13	85.6(3.3)	91.2(8.4)	48.0(6.0)	0.3	×	
May 15	22.9	13.2	8.0	0.7		
May 17	1.4	7.2	3.0	1.3	×	×
May 18	6.9	6.0	4.0	0.9		×
May 20	16.6(3.9)	10.8(9.6)	6.5	1.4		
May 21	1.5	3.6	3.5	0.4		×
May 24	3.2	31.2	4.0	2.7		

Values in parenthesis corresponds the data obtained during the runoff sampling period.

* : 5 minute moving average rainfall intensity

表面流出過程のモデル化

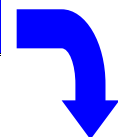
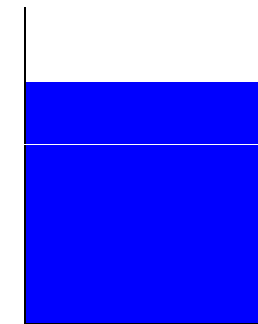
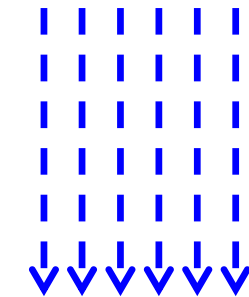
- 不浸透面と浸透面の区別
異なる有効降雨の設定
屋根と道路における異なる流出過程
- 初期損失の設定
- 貯留係数の設定

Reservoir Coefficient (K^*)

線形貯留モデル

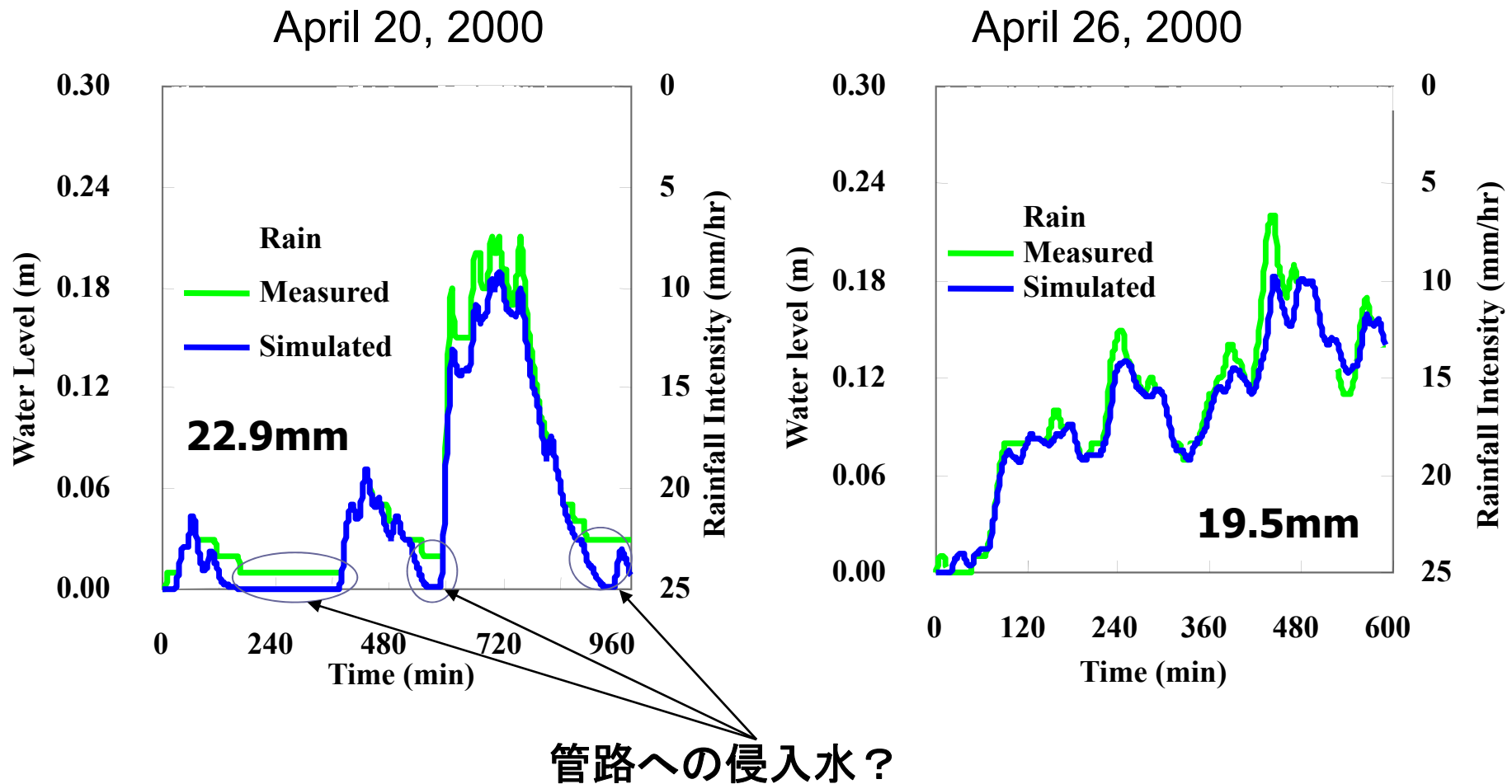
$$\frac{dS(t)}{dt} = i(t) - q(t)$$

$$K^* S(t) = q(t)$$

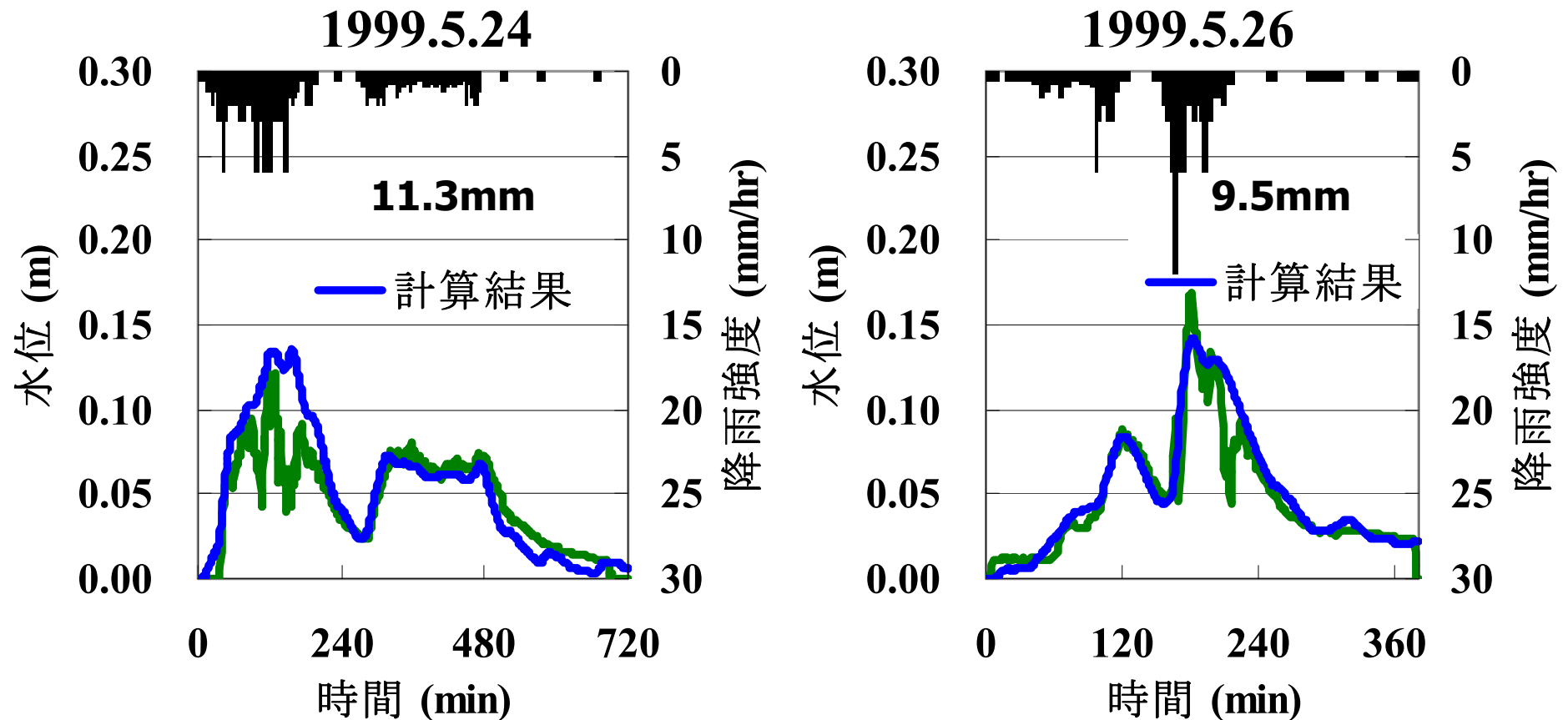


屋根		道路		浸透域	
初期損失 [mm]	K^* [1/sec]	初期損失 [mm]	K^* [1/sec]	初期損失 [mm]	浸透能 [mm/hr]
0	0.01	0.5	0.0005	6	10

雨水流出パラメータ値の検証



雨水流出パラメータ値の検証



➤ 雨水の流出は不浸透面(屋根・道路)からのみ発生している

汚濁負荷流出のモデル化

- Sartor and Boyd モデルとその改良
(Sartor et al, 1972, Hijioka et al, 2001)
- **限界流出量 (Critical runoff rate)** を、屋根と道路にそれぞれ設定することによる汚濁負荷流出過程を精緻に表現する工夫。

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -k_i (R_i(t) - R_{ci}) P_i(t)$$

P_i : 汚濁物堆積量 [kg/ha]

R_i : 雨水流出量 [mm/hr]

k_i : 汚濁負荷流出係数 [1/mm]

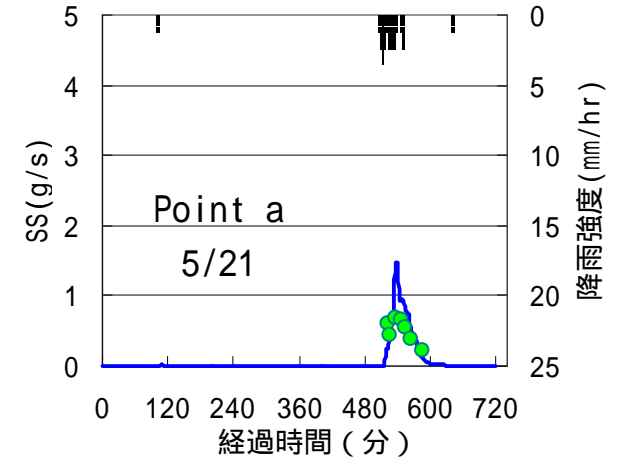
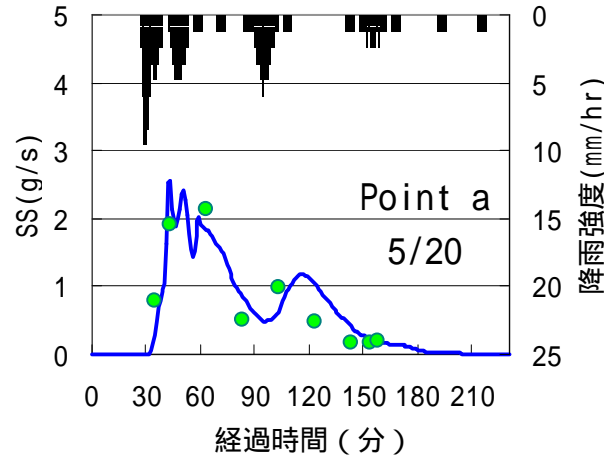
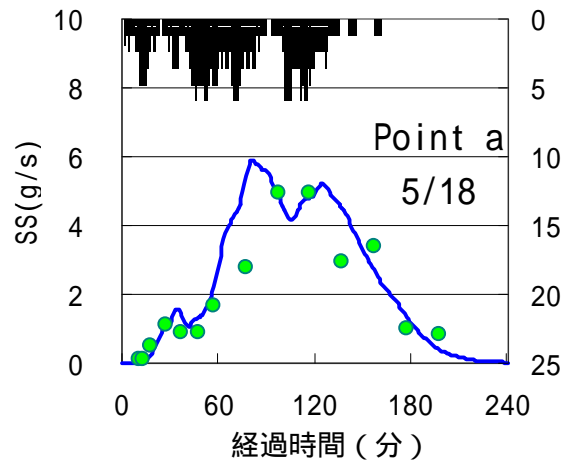
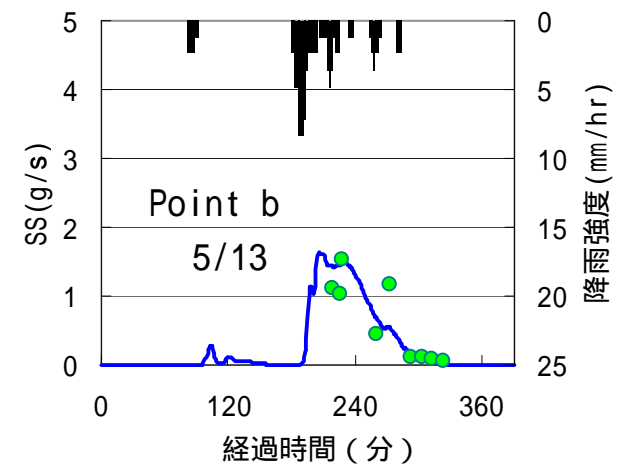
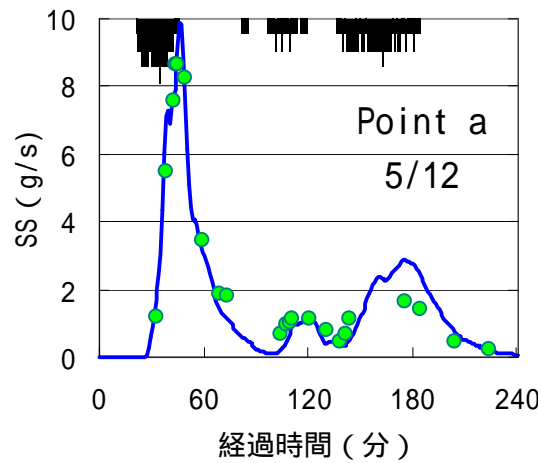
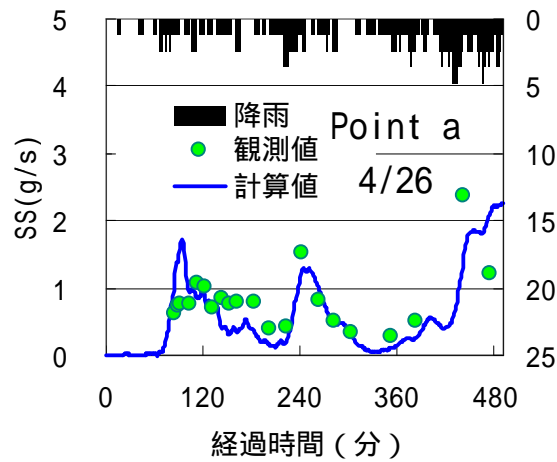
R_{ci} : **限界流出量** [mm/hr]

P^0 : 初期汚濁物堆積量 [kg/ha]

$i = 1$ (屋根) and 2 (道路)

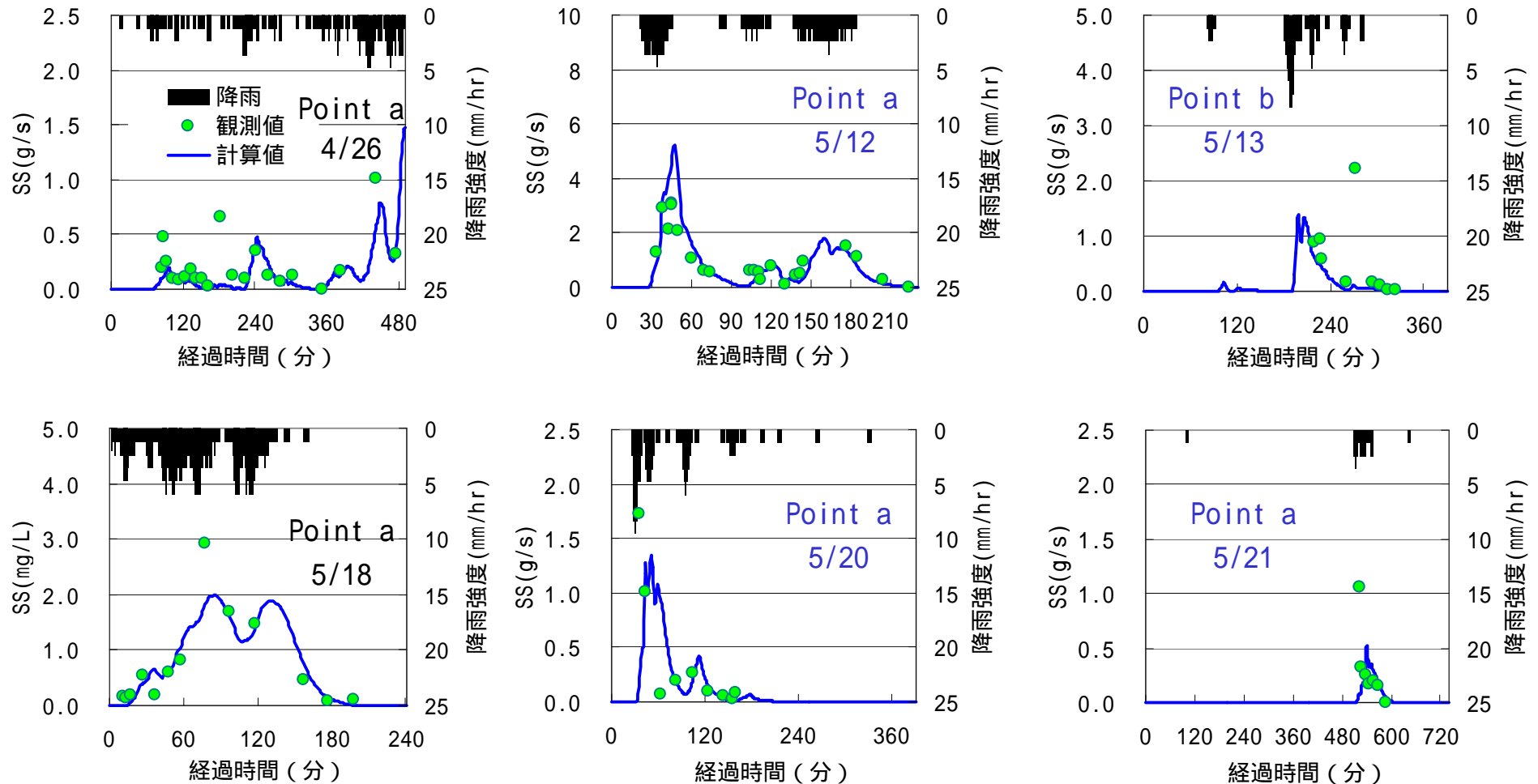
SSポリュートグラフ(細粒子)

Hijioka(2001)



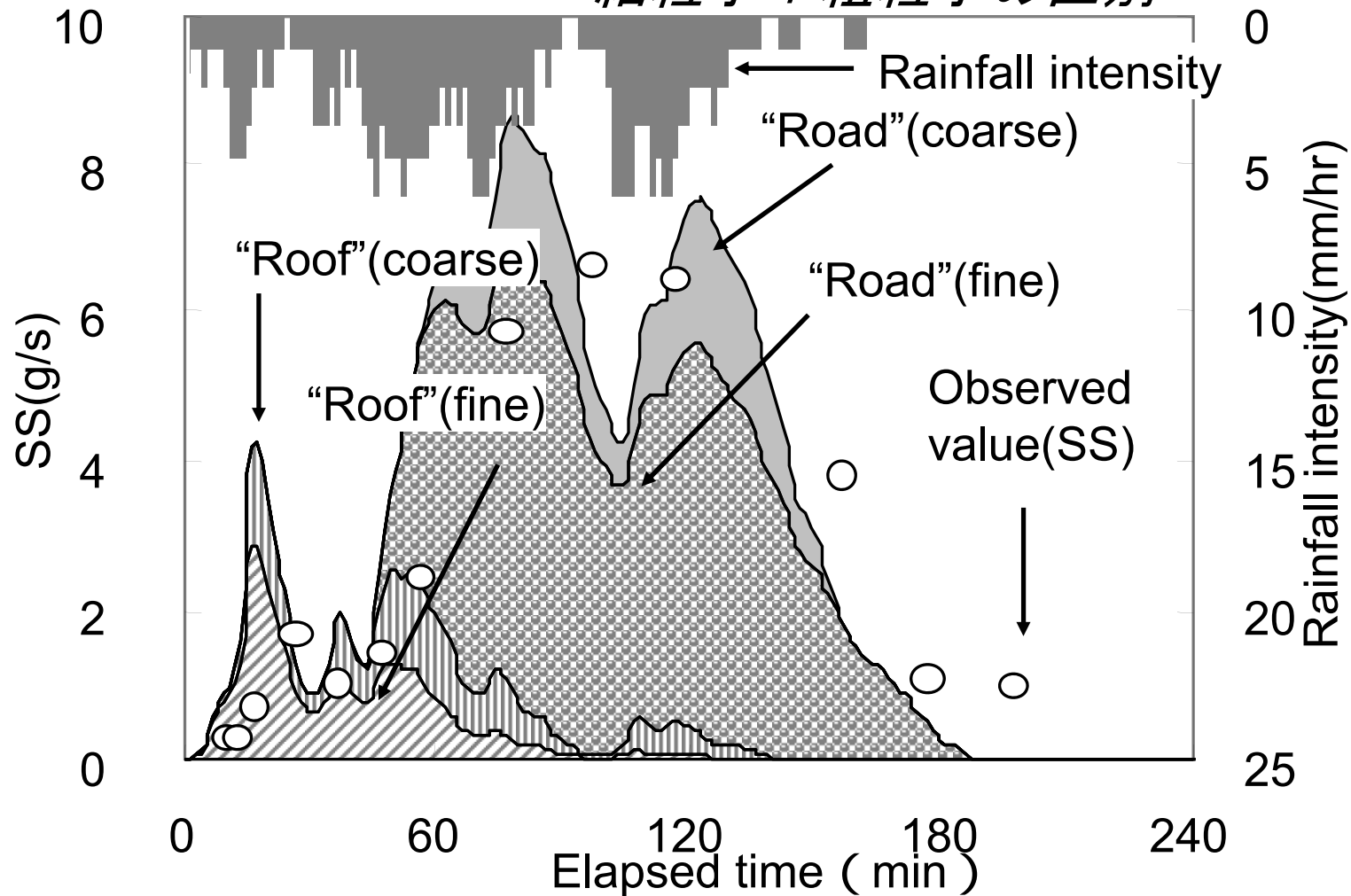
SSポリュームグラフ(粗粒子)

Hijioka(2001)



道路と屋根からのSS 汚濁負荷流出

細粒子+粗粒子の区別



Hijioka et al. (2000)

4. 都市流出モデル解析における展望

- 下水道施設GISデータの活用と充実・更新 *電子化都市情報活用
地表面特性評価の高度化*
- 都市計画地理情報や高分解能衛星画像の活用
- XバンドMPLレーダー雨量の活用 *高解像度の降雨情報の活用*
- 下水道施設の運転管理情報の蓄積 *浸透・貯留施設データの精査*
- モデル向上のためのモニタリングの実施 *ポンプやゲートの管理情報*
- モニタリングデータ蓄積・共有 *効率的なモニタリングの実施*
- データなど精度管理、更新
- モデルパラメータ検定手順、感度解析
- 人材確保、技術の集約と普及

アイデア！ 流出解析モデル利用の検定？資格認定？

まとめと今後の課題

■ モデル計算手法をより魅力的なスタンダードツールへ

必要なモデルパラメータの検定や再現性の検証が、十分に行われる必要がある。過去の雨水流出現象を再現できる検定・検証の重要性を再認識すべきである。

■ 魅力的なモデル検証データの入手へ

モデル検証のための管路内水位や浸水深などの記録が大事になる。降雨分布情報の入手も。自治体による雨天時モニタリングの体系だった実施。

「経験・実績」から「予測・制御」へ

雨天時流出シミュレーションの活用

モニタリングとモデリングの連携と融合

既存施設の機能の最大限活用による制御・管理

「守り」から「攻め」へ

管理・モデル検証のため管内水位のモニタリング

量抑制に加えて、涵養・ノンポイント対策を含めた多機能

効果的で効率的な対策
検討のために

住民を意識したわかりやすい
対策効果の表示



*Thank you
for your attention*

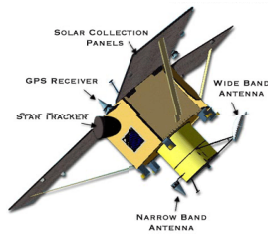
都市域の雨天時汚濁流出解析におけるモデリングの視点

- 1) 都市における水管理の視点
- 2) 都市における雨水流出モデル
- 3) 浸透・貯留施設を考慮した雨水流出解析
- 4) 都市ノンポイント汚染と汚濁流出解析
- 5) 都市流出モデル解析における展望

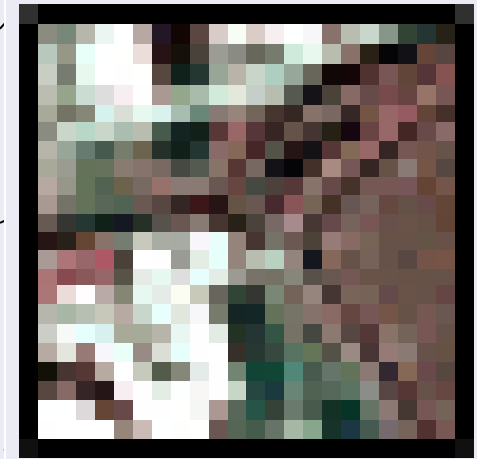
東京大学大学院工学系研究科
水環境制御研究センター・都市工学専攻
教授 古米 弘明

都市域における高解像度衛星画像の活用

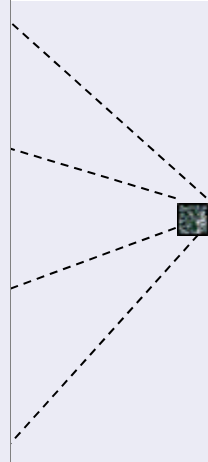
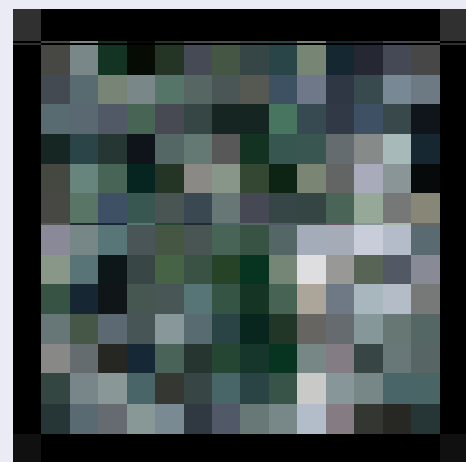
IKONOS



1/5,000 (IKONOS-1m)



1/50,000 (SPOT 5-10m)



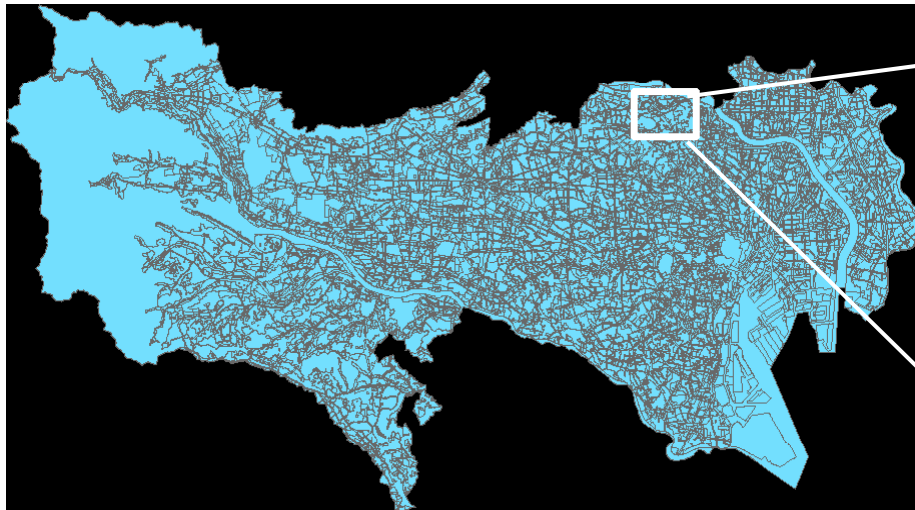
1/75,000 (Landsat 7-15m)



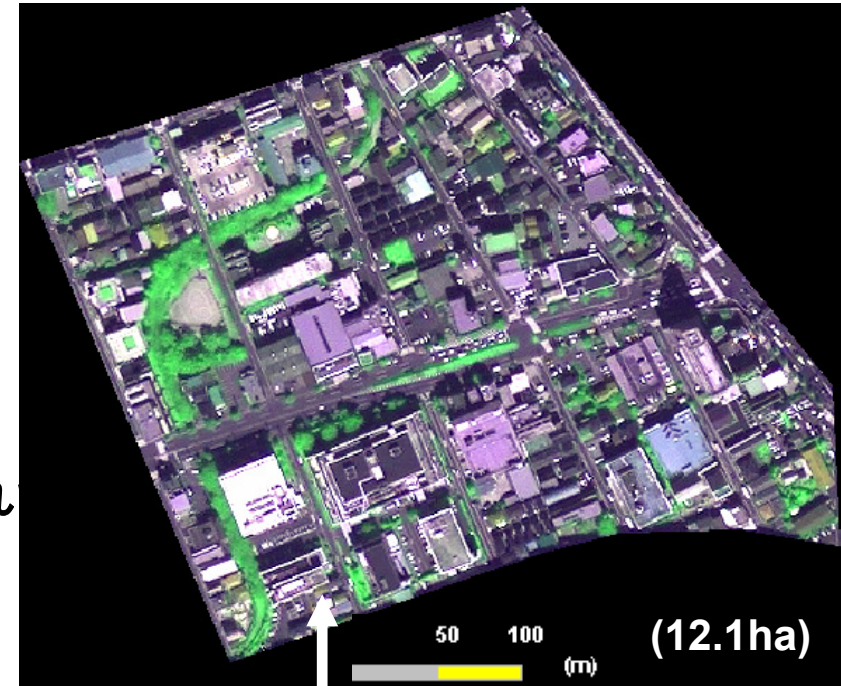
1/150,000 (Landsat 7-30m)

解析対象地区

- 志村ポンプ排水区の一部(東京都板橋区)
- 住居地域、公園、幹線道路、商業用ビル等が含まれている
- 緑化された屋上、団地内の緑道、植栽され中央分離帯 などの植生地が散在



解析対象地域の位置

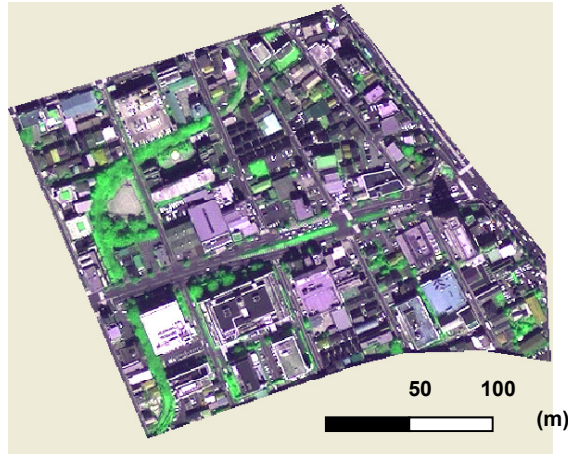


志村ポンプ排水区 (- : 管路網)

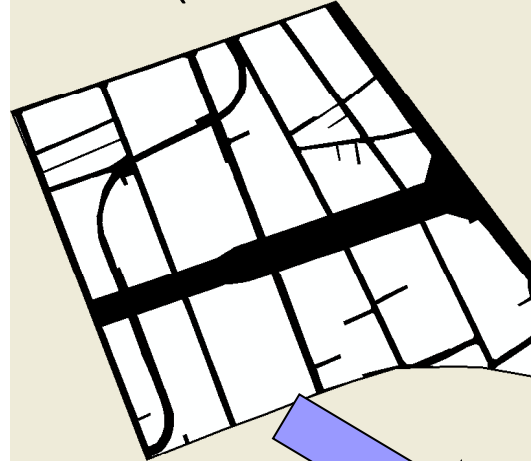
都市計画地理情報と衛星画像の重ね合わせ

IKONO衛星画像

マルチスペクトル画像 - 赤/青/緑/近赤外



道路レイヤー(土地利用現況データ) 建物レイヤー(建物現況データ)



植生地レイヤー
(NDVI + NVEI)

