

市街地からの懸濁汚濁物質 の流出過程とその特性評価

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. 市街地雨天時汚濁負荷流出量調査
2. 不浸透面を屋根・道路に区別した雨水流出解析
3. 雨水時汚濁負荷流出のモデル解析
4. 調査研究と汚濁解析のまとめ

1

研究の背景

- ◆ 都市ノンポイント汚染やCSOによる公共用水域の水質汚濁
 - 排ガス・煤煙等に含まれる微量有害化学物質・重金属等の問題
 - 雨天時合流式下水道越流水問題、汚濁対策効果の定量的評価
 - ✓ 降雨パターン, 土地利用, 下水道ネットワークにより負荷流出特性は異なる
 - ✓ 雨天時のイベント的な汚濁負荷流出現象を適切に表すモデルが必要

- ◆ 分布型モデルを活用した雨天時汚濁流出解析
 - 地表面・下水管内のプロセス毎にモデル化が可能
 - 地理情報システムと組み合わせより高度な解析が可能
 - 有効な市街地面源汚濁対策の提案へ

2

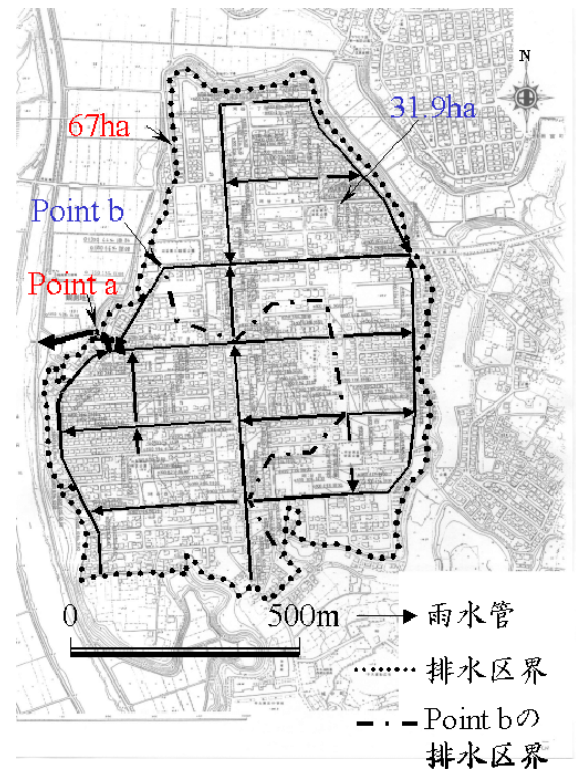
1. 市街地雨天時汚濁負荷流出量調査

➤ 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



3

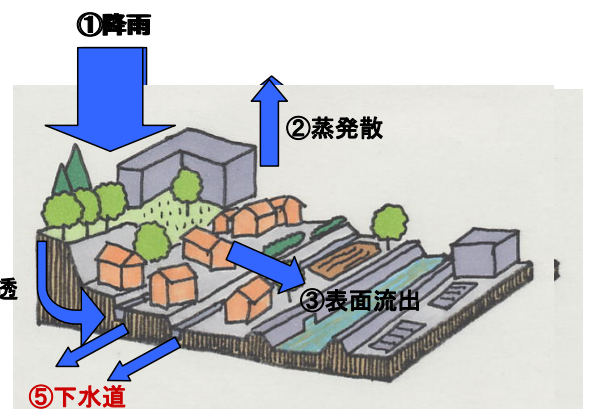
都市域の雨水流出過程と解析モデル

“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

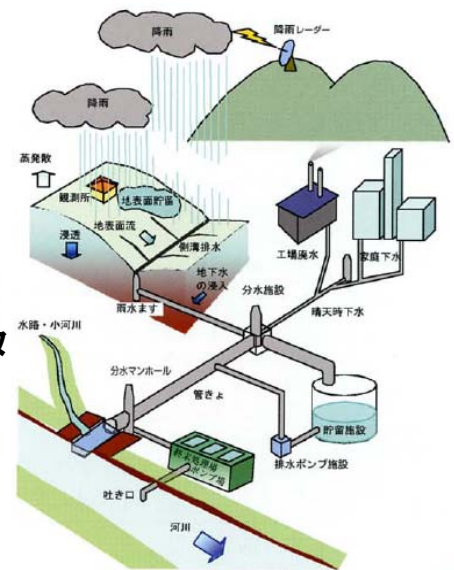


都市域の雨水流出メカニズム

4

分布型モデルによる都市域の雨水流出解析

- 解析に必要なデータなど
 - 降雨データ
 - 地表面データ(土地利用データ)
 - 管路やマンホールなどのデータ
 - ポンプやゲート施設と運転管理データ
 - 浸透、貯留施設などのデータ
 - 河川などの放流先の水位データ



- 解析の事例
 - 下水道管理台帳データや細密数値情報の活用
 - 浸透施設の流出抑制効果の定量評価
 - CSO解析、河川水位の影響を考慮した解析

細密数値情報(15種類の土地利用項目)

071107070707070707 1108080808 11110707070707 11111111111111 10
 071107070707070707 061108081111070707070707 1111111111 080810
 070707070707070707 0611081111070707070707 111111111111 08080808
 071107070707070707 0611110707070505 1011111111111111 008080808
 07110707070707 1111111111 0707050505 1111111111111111 08080808 11
 07071111111111 0712120711111305051111111111 101007110808081111
 07071111070713121212120711131111111111 101010070711111111 0707
 07071111070712121212071111111111 101010101010 07111111 070707
 0707111107071212121212 1111111111 1212121310101111111111 070707
 1111111111 07121212111111111111 10121212121212 1108081111110811
 0707070707 1111111111111111 1011111212121212 021108080811080808
 0707070707 111111111111 070707 111111111111111111 08080811110808
 090910071111111111 0707070707 11070707070707 11111111111111 0808
 1009091111111111 070707070707 1107070707070707 1108080808 111111
 101111111111 0707070707070707 11070707070707 110808080808 1108
 111111111111 1070707070707070707070707070707 110808080808 1108
 111111 070711070707070707070707 11070707070707 1111111111 031111
 1107070707 11070707070707070707 11070707070707 110707070707 1111
 0707070707 11070707070707070707 110707070707 1111070707070707 11
 0707070707 11070707070707070707 11070710101010 1107071212070707

- 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

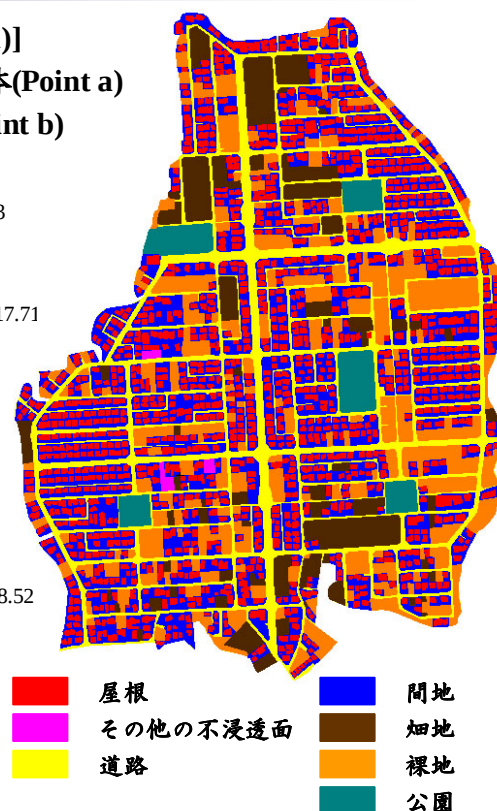
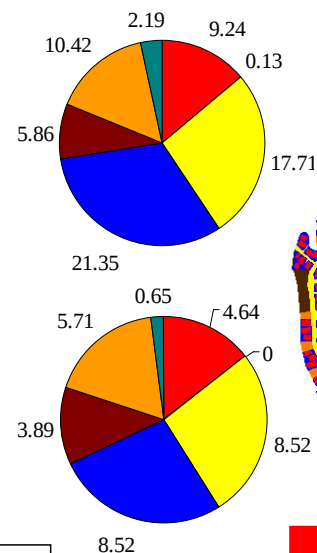
調査の特色/工種分布

＜調査のポイント＞

- 同排水区内2地点同時観測
- 雨量・水位の長期連続測定
- 連続降雨におけるSS測定
- ファーストフラッシュ捕捉
- 粒子径別SS濃度測定
- 濁度測定(SSデータの推定)

屋根:15%、道路:26%

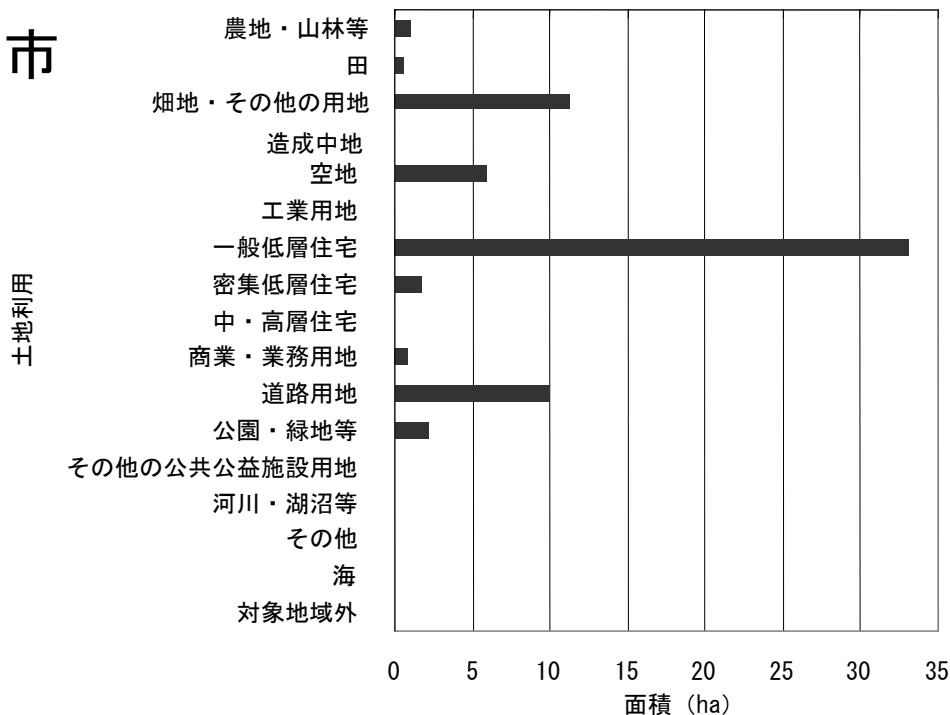
[工種面積(ha)]
上段：排水区全体(Point a)
下段：排水区(Point b)



7

細密数値情報を利用した土地利用例

牛久市



8

屋根・道路・浸透域の割合（暫定案）

牛久市刈谷排水区の土地利用

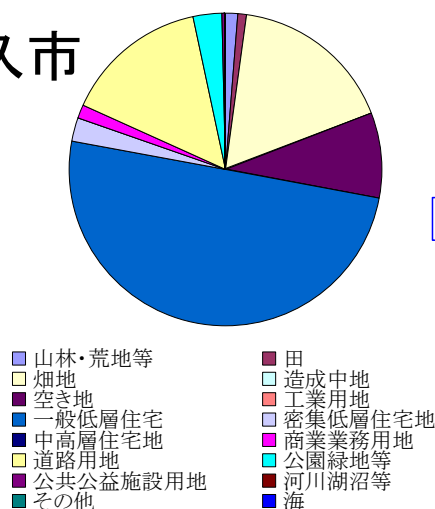
土地利用	割合 (%)	屋根 (%)	道路 (%)	浸透域 (%)
山地・荒地等	1.4	0	0	100
田	0.7	0	0	100
畑・その他用地	21.3	0	0	100
造成中地	0.0	0	0	100
空地	9.0	0	0	100
工業用地	0.0	40	10	50
一般低層住宅	47.0	25	20	45
密集低層住宅	0.2	85	5	10
中・高層住宅地	0.0	60	10	30
商業・業務用地	1.5	90	10	0
道路用地	15.8	0	100	0
公園・緑地等	2.8	0	0	100
その他の公共公益施設用地	0.3	60	30	10

脇岡靖明, 市川新, 古米弘明: 下水道台帳データベースと細密数値情報を利用した分布型モデルによる都市雨水流出解析, 下水道協会誌, Vol.38, No.469, pp.79-90, (2001)

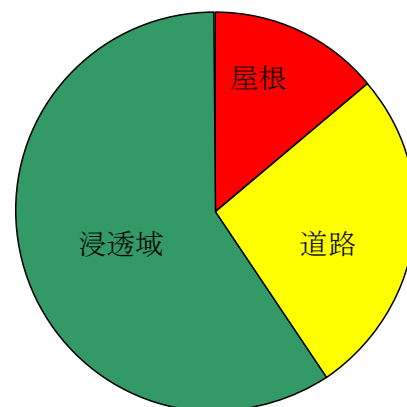
9

細密数値情報を用いた工種面積推定

牛久市



屋根,
道路,
浸透域,
の割合



屋根: 15%、道路: 26%

● 土地利用毎に屋根・道路・浸透域の割合を設定

- 他排水区の工種面積推定への応用の可能性
- 土地利用の変化などによる流出量の変化を予測可能
市街化、土地開発、浸透性舗装導入、屋根雨水利用など

10

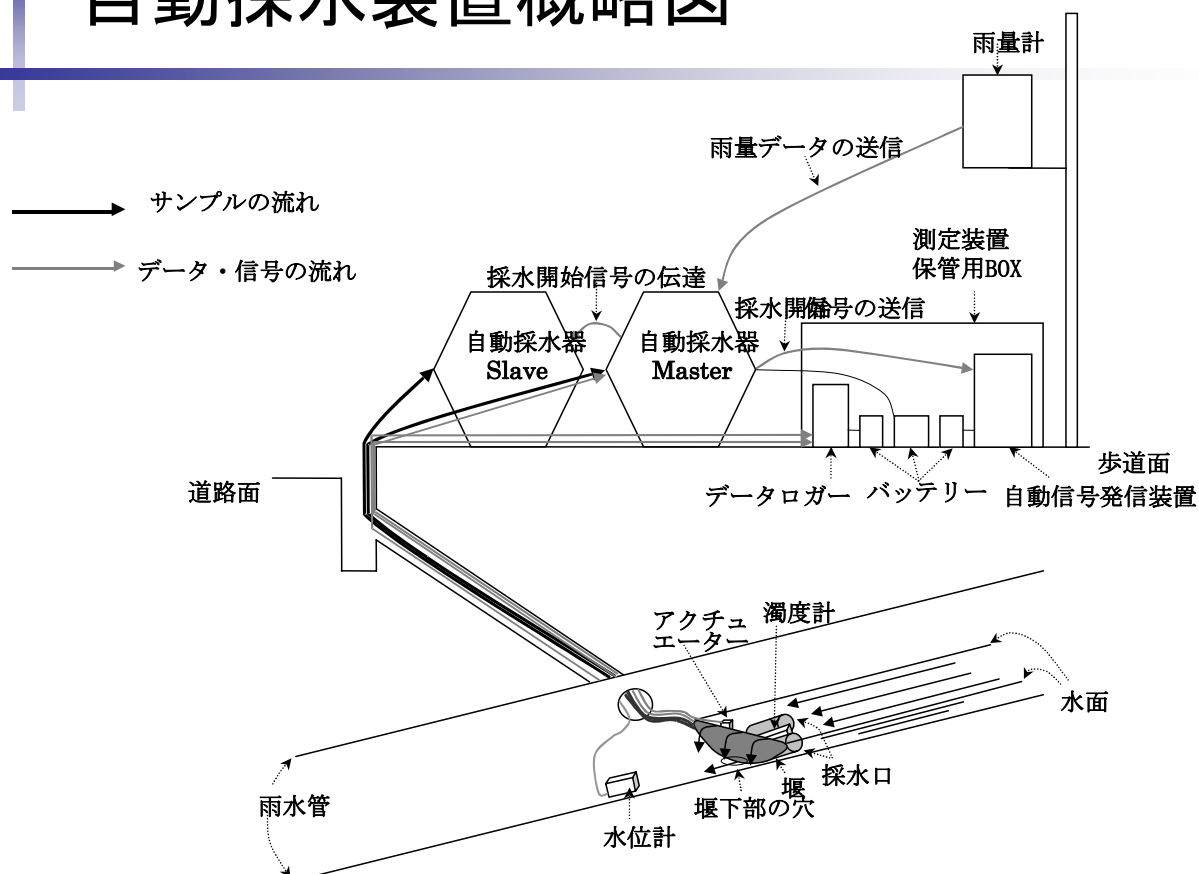
観測降雨(2000年4月～5月分)

Date	Rainfall Height	Maximum Rainfall Intensity*	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	○	○

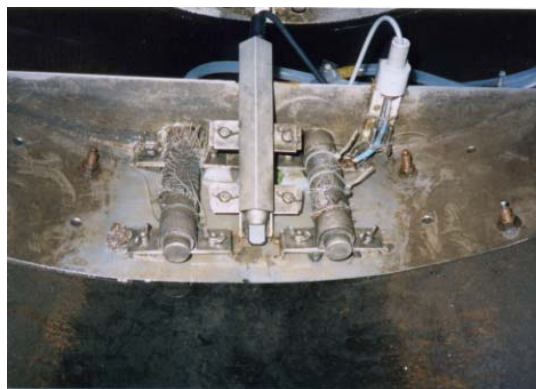
Values in parenthesis corresponds the data obtained during the runoff sampling period.

* : 5 minute rainfall intensity

自動採水装置概略図

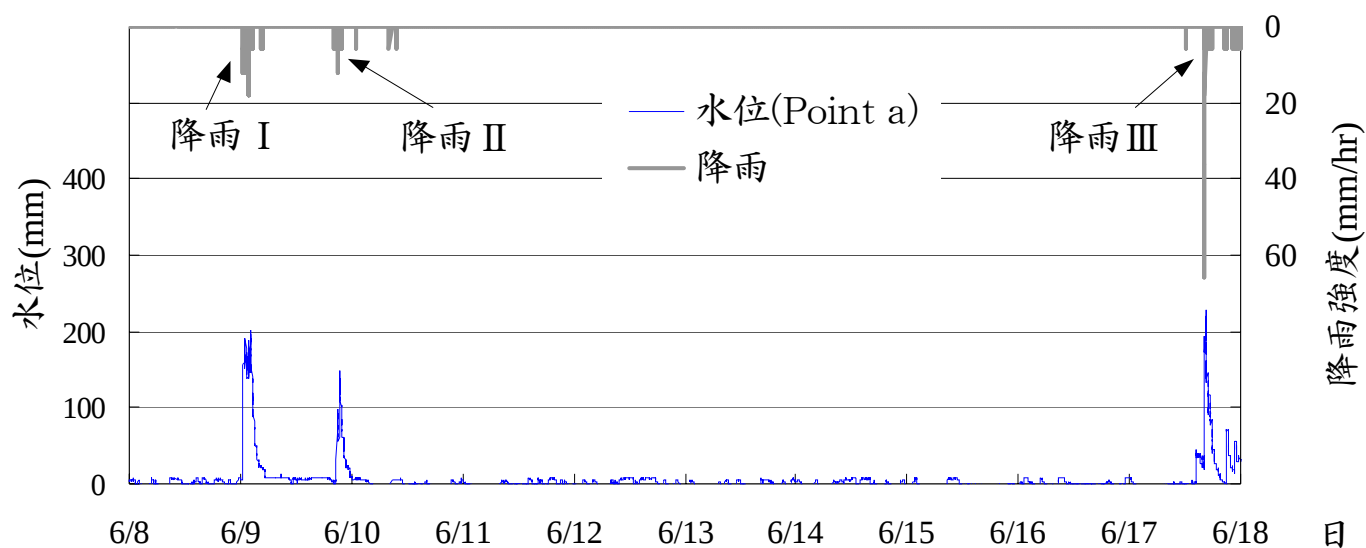


採水装置設置場所 & 採水口



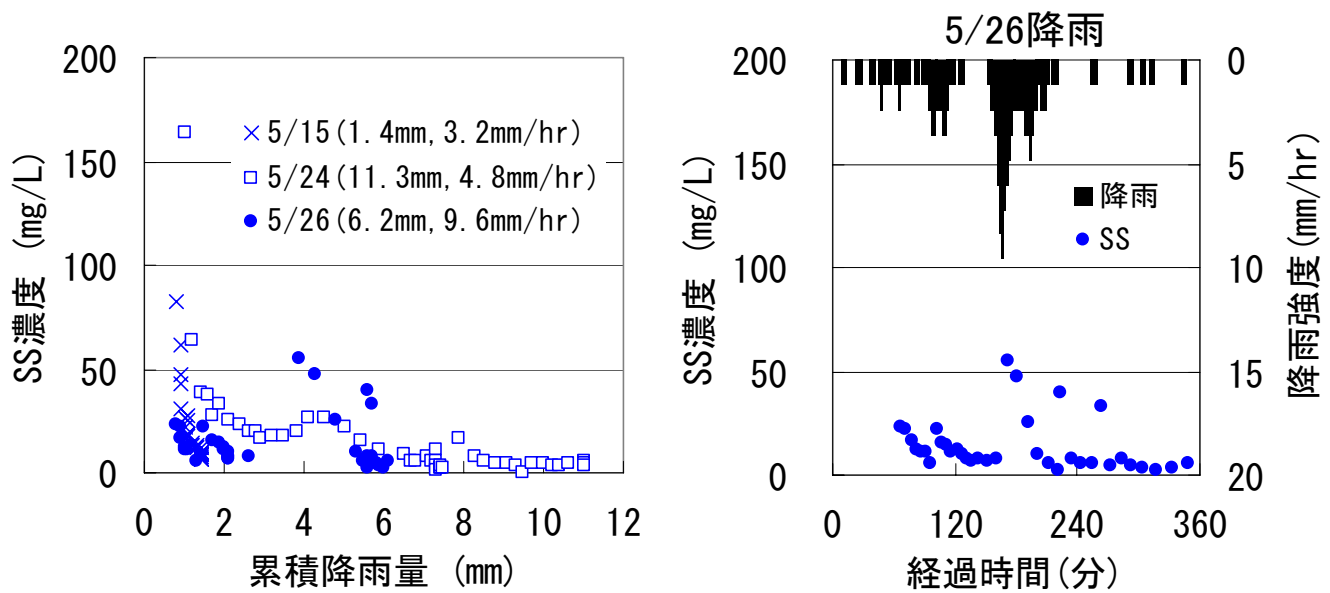
13

観測雨量及び水位の連続測定結果



14

SS流出特性



累積降雨量の増加に伴い濃度低下

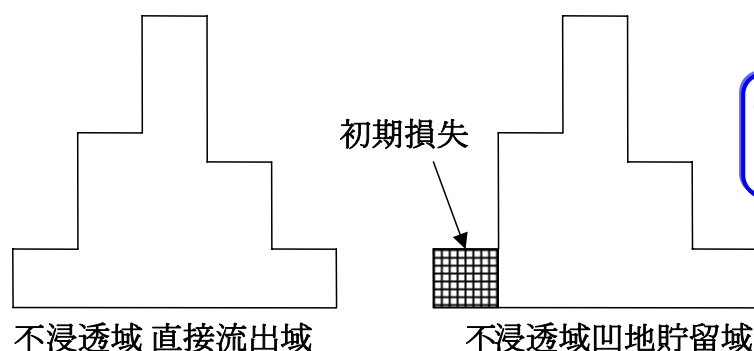
降雨強度に応じた負荷流出量変化

脇岡靖明, 古米弘明: 自動採水・測定装置を用いた分流式下水道排水区における長期連続雨天時都市ノンポイント負荷流出調査, 水環境学会誌, Vol.26, No.4, pp.237-242 (2003)

15

2. 屋根と道路を区別した雨水流出解析

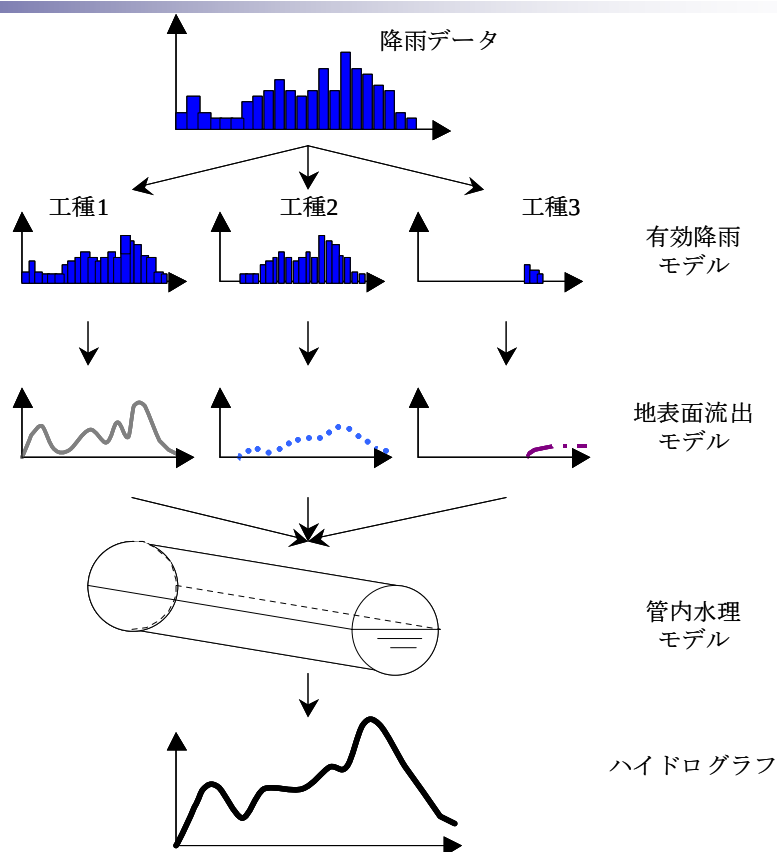
- 不浸透面→屋根, 道路
 - 工種特性を考慮したパラメータ値



● 有効降雨
モデル

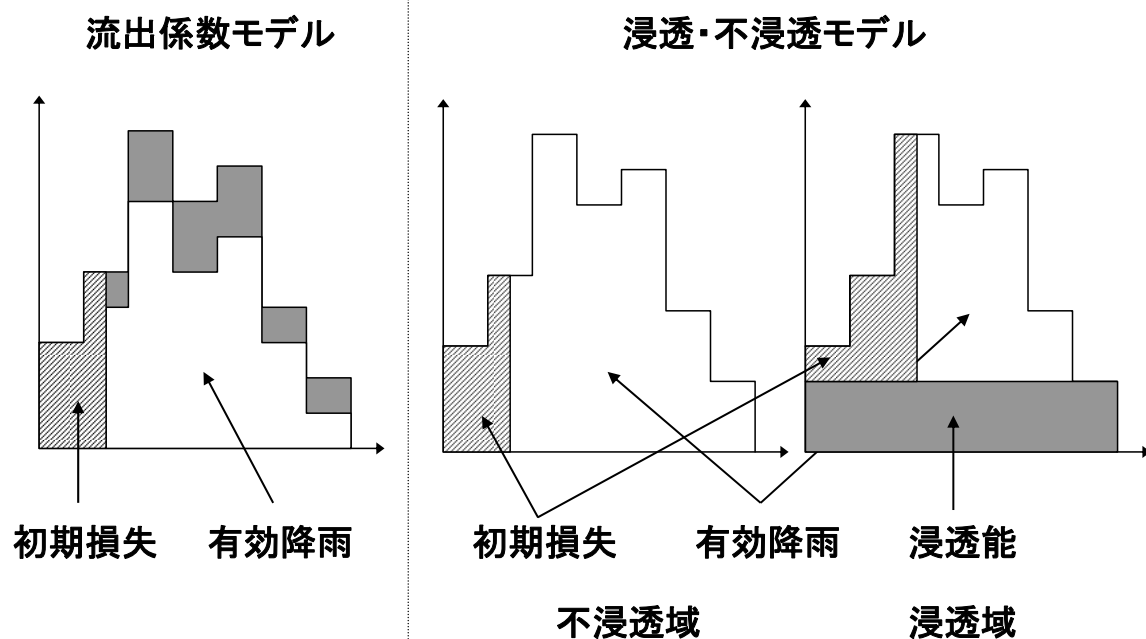
16

雨水流出解析モデル



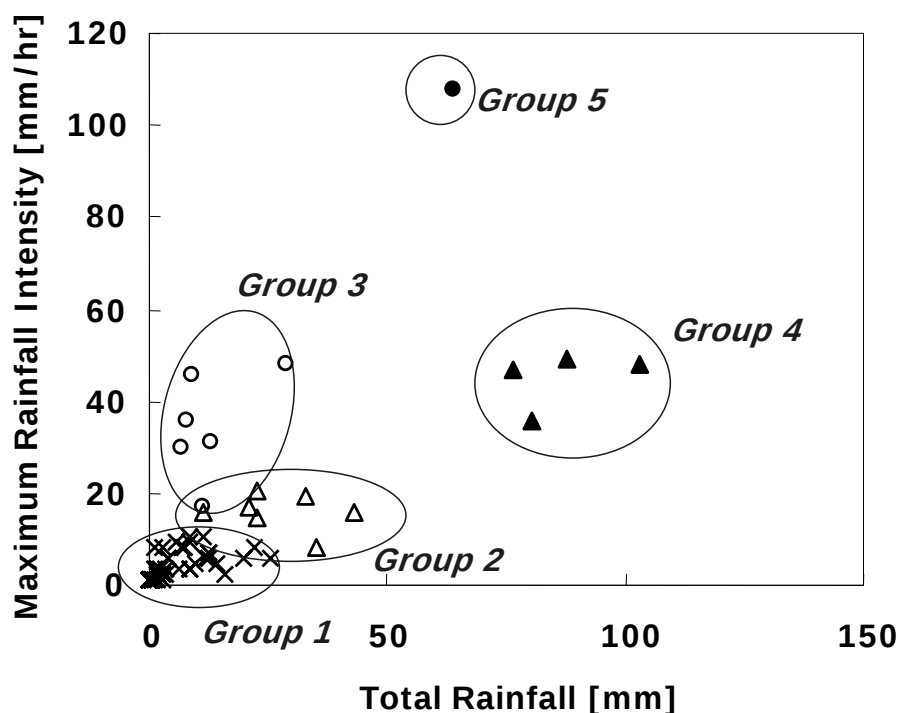
17

有効降雨モデル



18

総降雨量と最大降雨強度による降雨分類



19

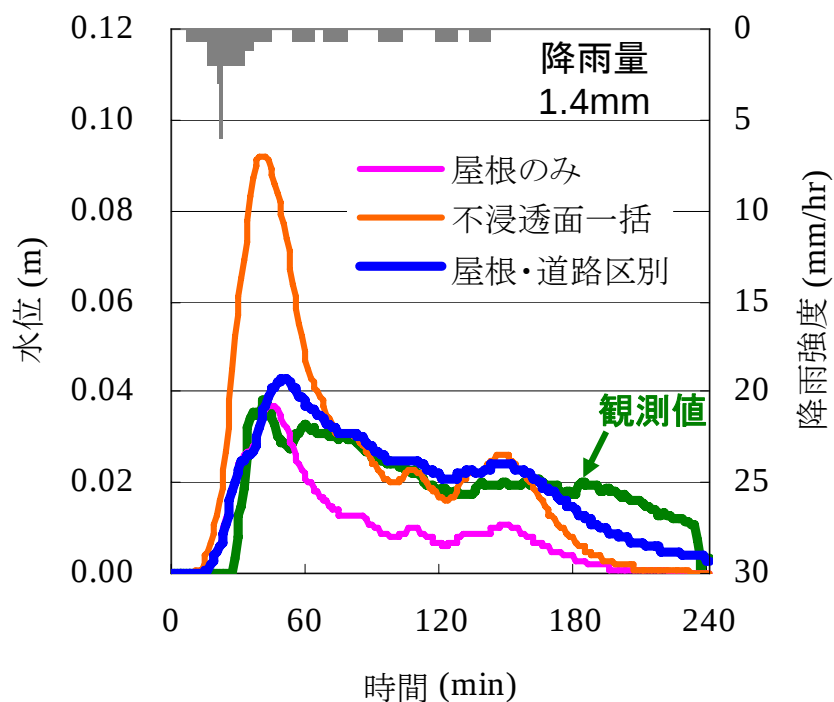
初期損失及び貯留係数の検討

➤ 屋根:直接流出域

➤ 道路:凹地貯留域
(初期損失0.5mm)

➤ 貯留係数
屋根: $0.01s^{-1}$
道路: $0.0005s^{-1}$

✧ 異なる雨水流出特性を
考慮し再現性が向上



表面流出過程のモデル化

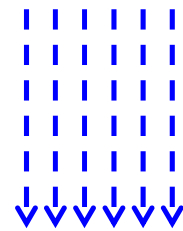
- 不浸透面と浸透面の区別
異なる有効降雨の設定
屋根と道路における異なる流出過程
- 初期損失の設定
- 貯留係数の設定

Reservoir Coefficient (K^*)

線形貯留モデル

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

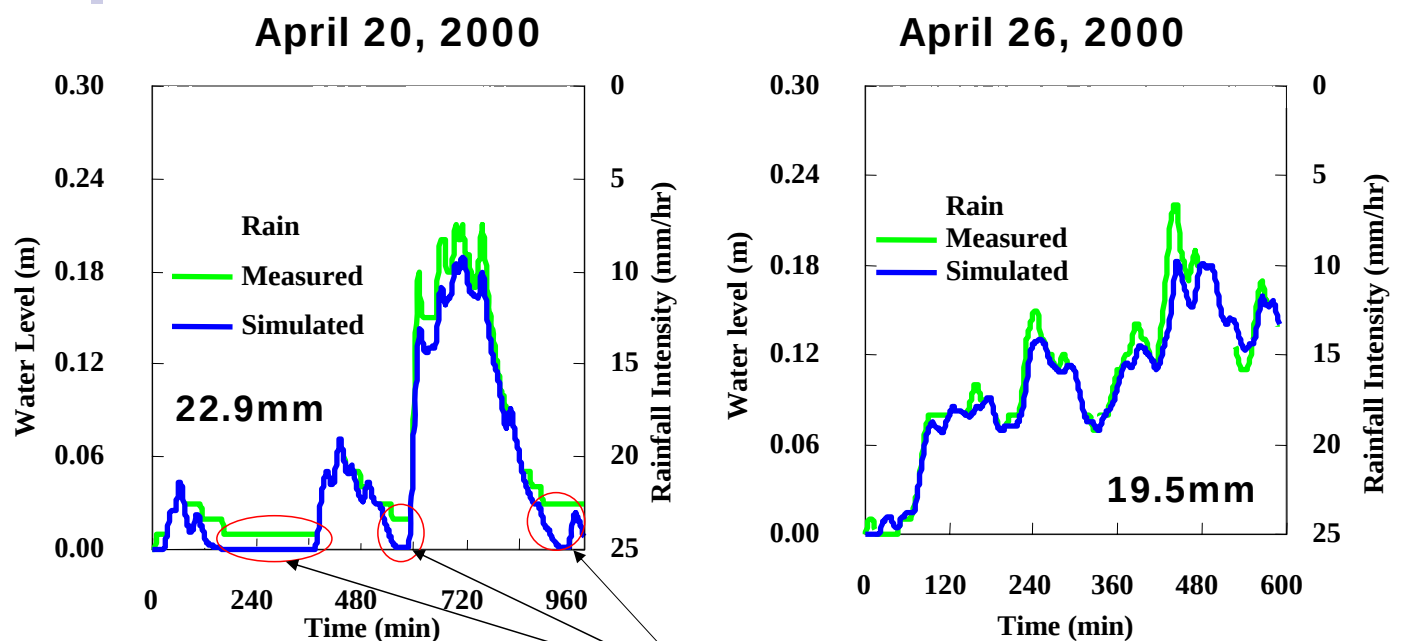
$$K^* S(t) = q(t)$$



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

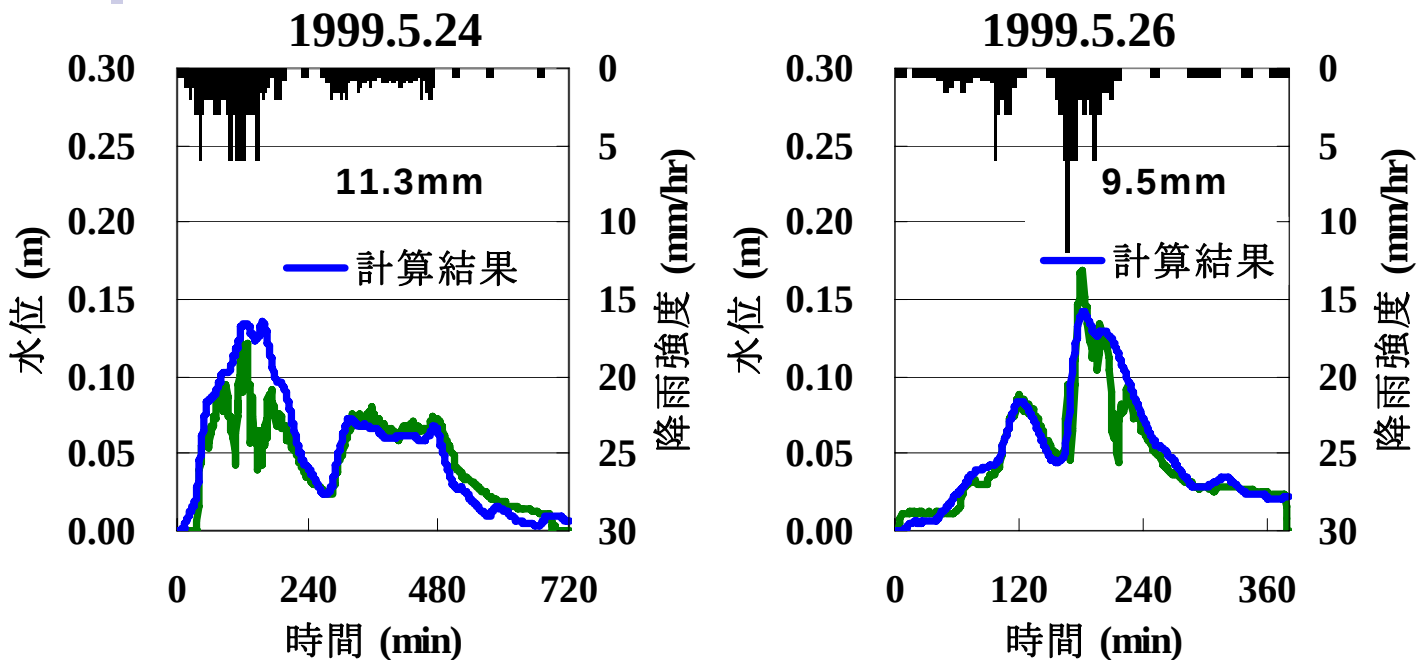
21

雨水流出パラメータ値の検証



管路への侵入水？

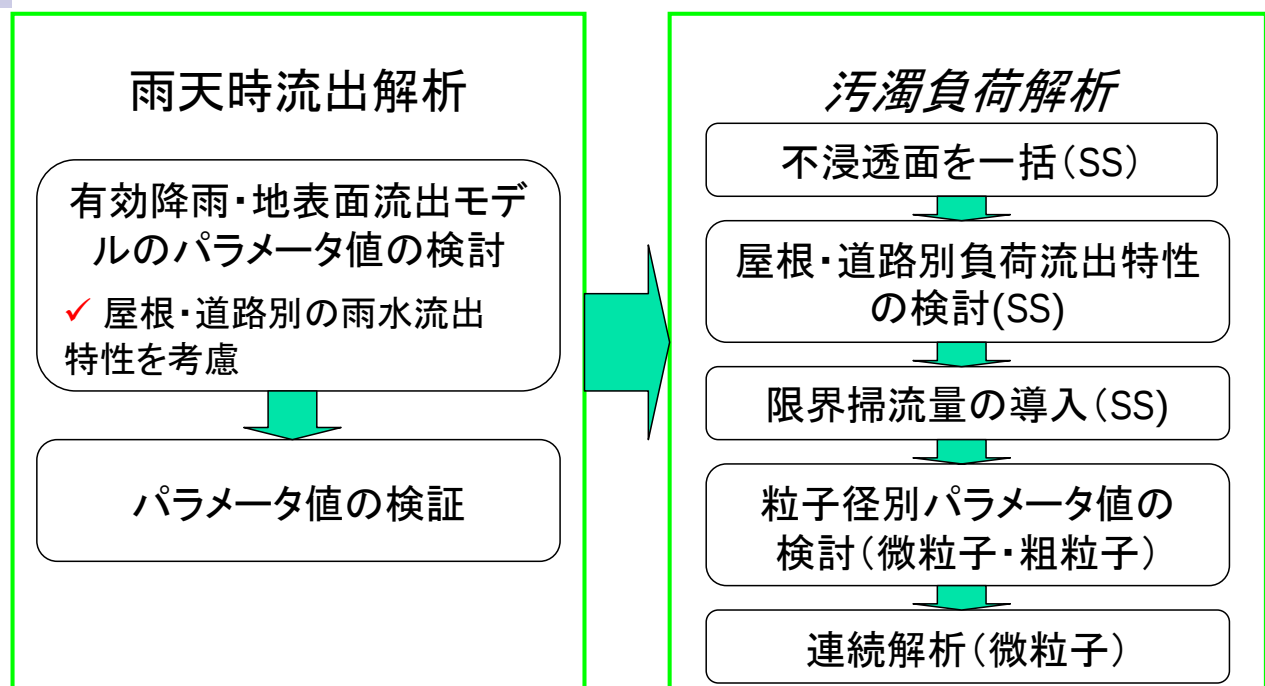
雨水流出パラメータ値の検証



➤ 雨水の流出は不浸透面(屋根・道路)からのみ発生している

23

3. 雨天時汚濁負荷流出解析



*地表面負荷流出モデル: Sartor and Boyd model

24

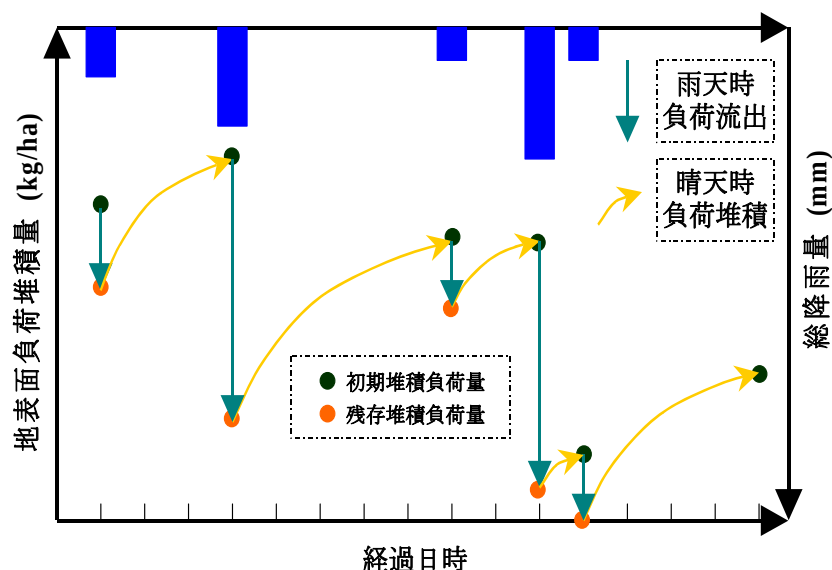
連続降雨の負荷流出量調査の利点

◆ 従来の調査

- 単一降雨の調査
- 地表面堆積負荷量調査に基づく連続解析

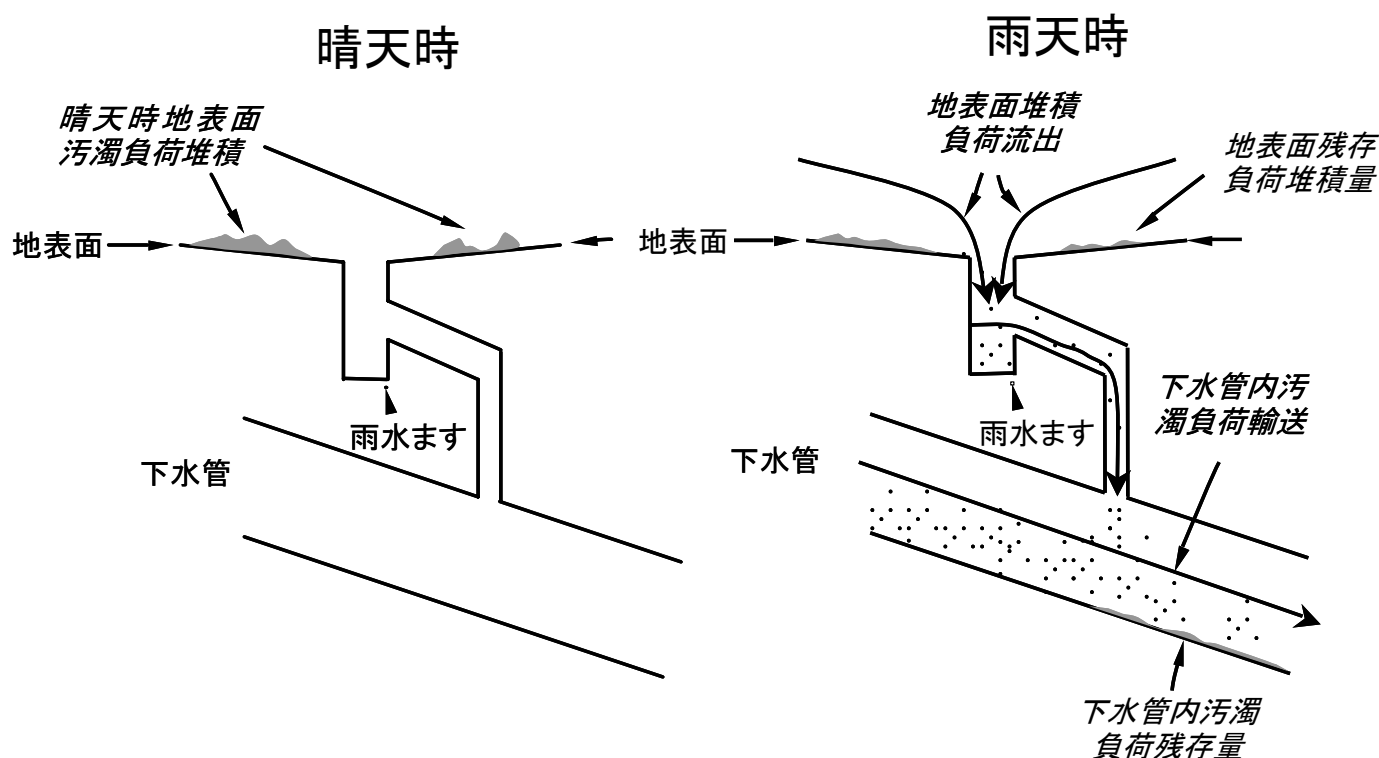
● 本調査

- 連続する降雨の調査
- 連続降雨の負荷流出量調査に基づく連続解析



25

ランポイント汚染源負荷流出解析(SS)



26

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]

本研究での採用値

k_i : 汚濁負荷流出係数 [1/mm]

k : 1.0 (屋根), 0.2 (道路)

R_{ci} : 限界流出量 [mm/hr]

R_c : 0.5 (屋根), 1.0 (道路)

P^0 : 初期汚濁物堆積量 [kg/ha]

$i = 1$ (屋根) and 2 (道路)

27

粒子径別SS濃度測定

- 微量有害化学物質・重金属等は粒子径の小さなSS分に付着している割合が高い

(Sartor/Boyd, 1972, Hoffman et. al, 1984)

➤ $\sim 43 \mu m$, $\sim 45 \mu m$, $\sim 50 \mu m$



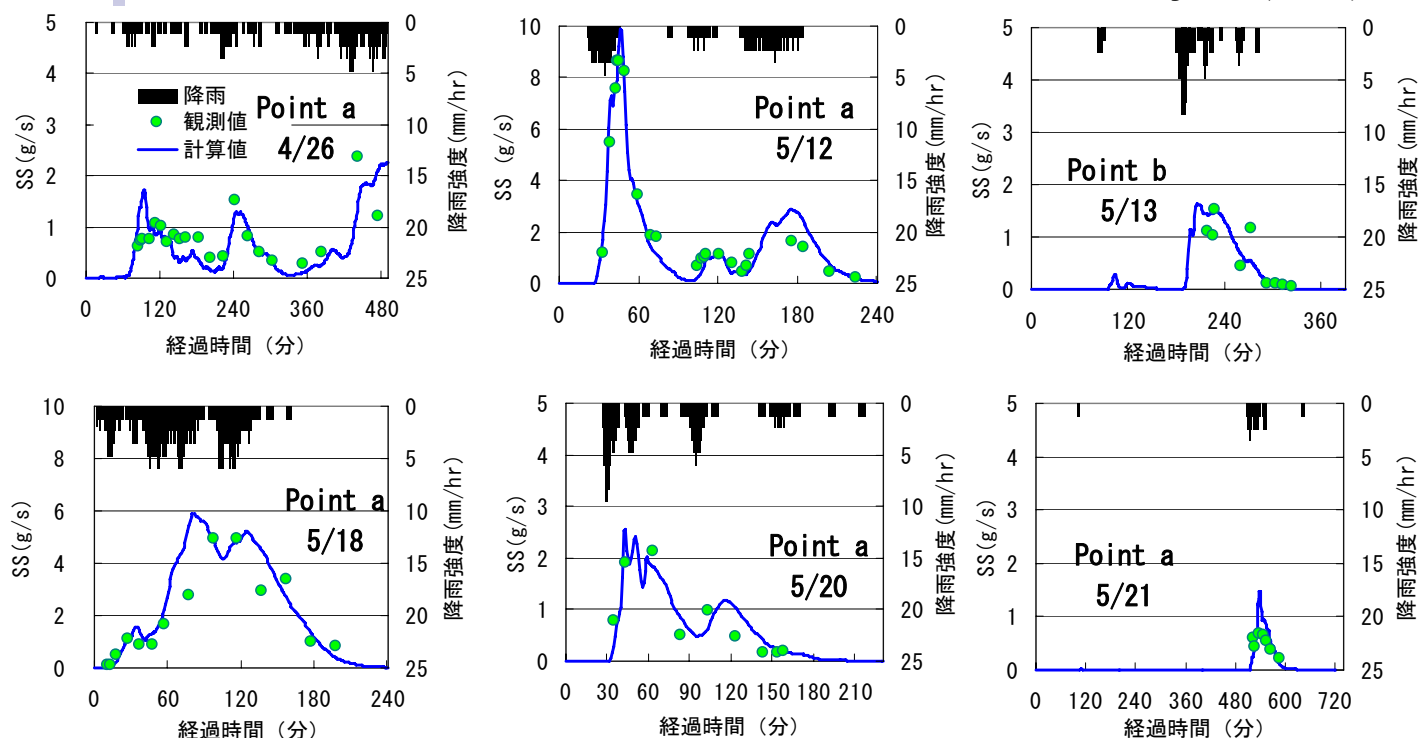
- SS (粒子径: $1.2 \mu m \sim 2mm$)
- 微粒子 (粒子径: $1.2 \mu m \sim 45 \mu m$)
- 粗粒子 (粒子径: $45 \mu m \sim 2mm$)

- ✓ 粒径別の流出・堆積特性を検討
- ✓ 発生源との関係も検討可能?

28

SSポリュートグラフ(細粒子)

Hijioka(2001)

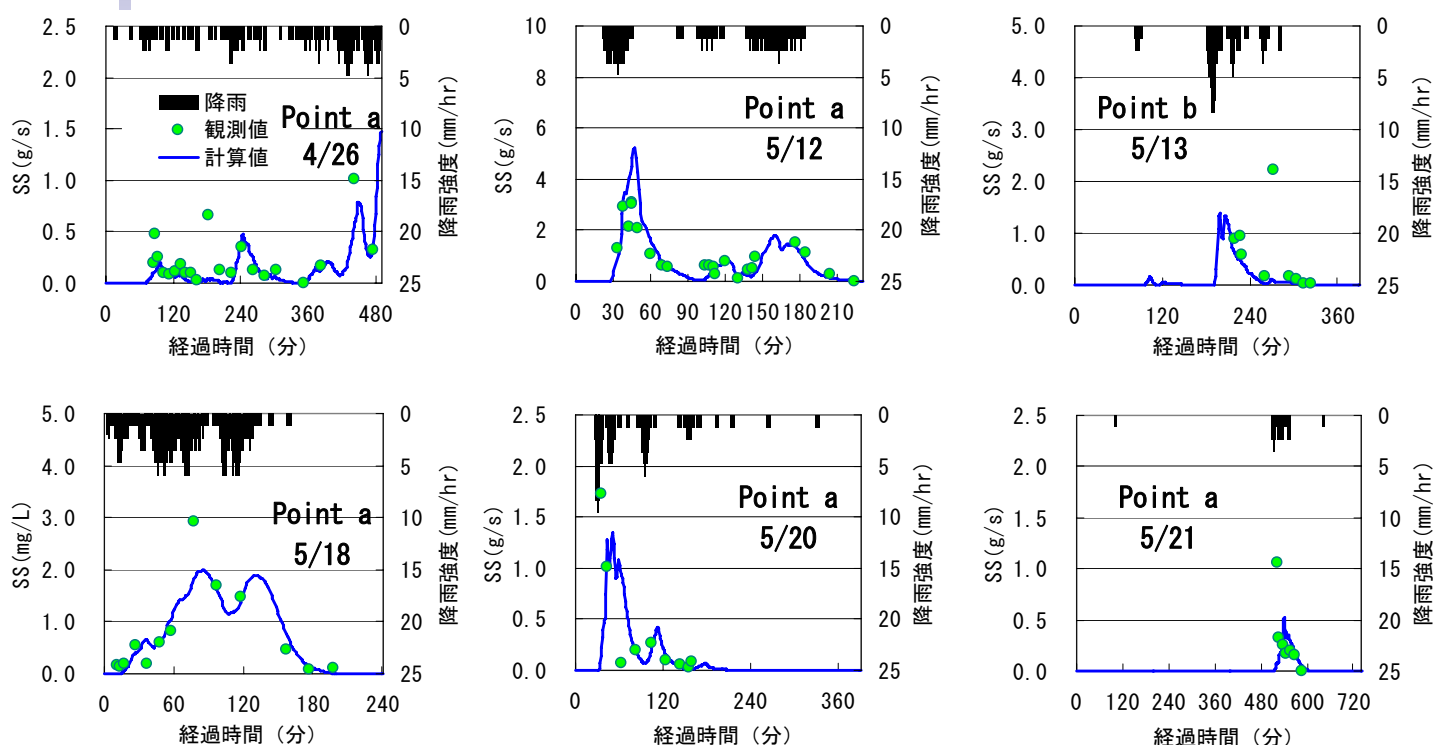


Hijioka Y., Nakajima F., Furumai H. (2001) Modified models of wash-off from roots and roads for non-point pollution analysis during first flush phenomena. Urban Drain.Modeling Symp., Urban Drain.Modeling

29

SSポリュートグラフ(粗粒子)

Hijioka(2001)



Hijioka Y., Nakajima F., Furumai H. (2001) Modified models of wash-off from roots and roads for non-point pollution analysis during first flush phenomena. Urban Drain.Modeling Symp., Urban Drain.Modeling

30

4. 調査研究と汚濁解析のまとめ

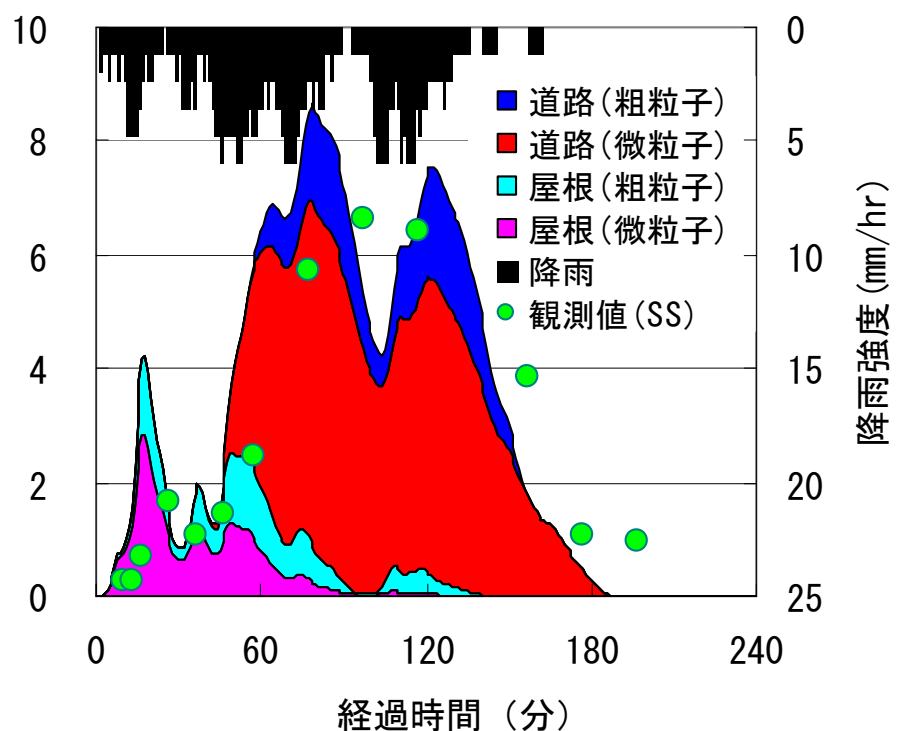
- 分流式下水道排水区における雨天時汚濁流出負荷量調査
 - ✓ 連続降雨を対象した自動採水装置を活用した観測
 - ✓ 粒子径別SS濃度の測定
- 不浸透面を屋根・道路に区別した雨水流出解析
 - ✓ 屋根：不浸透面直接流出域
 - ✓ 道路：不浸透面凹地貯留域
 - ✓ 細密数値情報を用いた工種面積推定方法の提案
- 地表面負荷流出モデルの再現性の検討
 - ✓ 屋根・道路別負荷流出特性を考慮
 - ✓ 限界掃流量を導入したSartor/Boyd modelの改良
 - ✓ 粒子径別に異なる負荷流出パラメータの設定
 - ✓ 連続解析の重要性(残存負荷堆積量把握の重要性)

31

粒子径別雨天時SS負荷流出解析の利点

➤ 粒子径別SS負荷の屋根・道路別流出量を適切に評価

✓ 粒子径別・工種別ノンポイント汚染源負荷対策の検討が可能

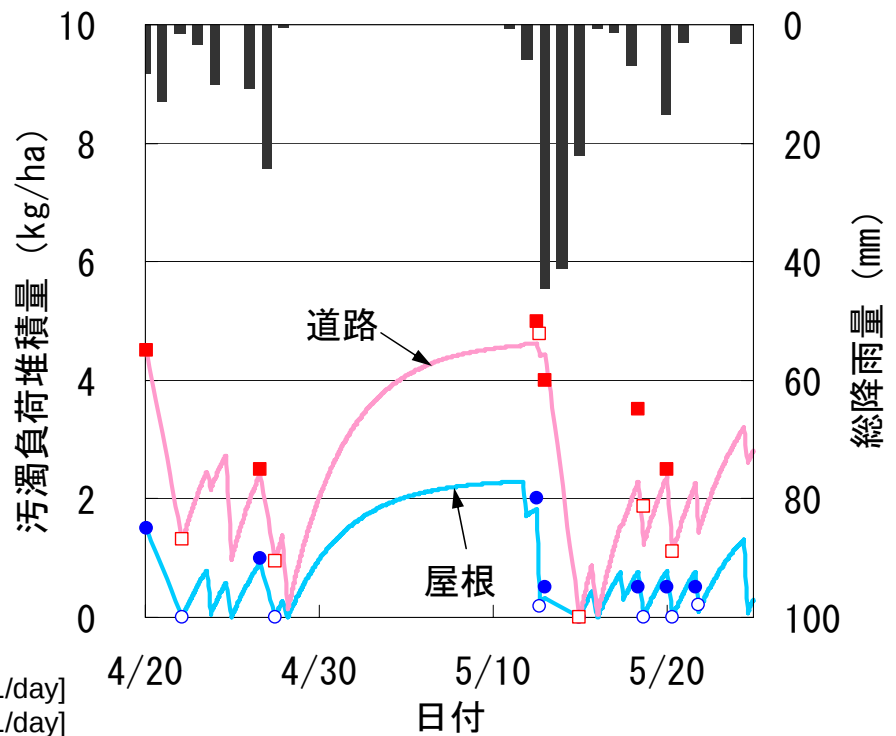


32

負荷堆積モデルを考慮した連続解析

微粒子

- 工種別に異なる堆積特性を表す必要
- 残存堆積負荷量を考慮することによって初期堆積負荷量を適切に推定



Exponential build-up modelの適用

Roof: $B = 0.7$ [kg/ha/day], $K_d = 0.3$ [1/day]

Road: $B = 1.4$ [kg/ha/day], $K_d = 0.3$ [1/day]

Hijioka Y., Furumai H. (2002) Integrated Modeling for build-up and wash-off behaviors of suspended fine particles on roofs and roads. ENVIRO 2002/IWA World Water Congr., Proceedings, e21391a