

(13) 都市域の合流式下水道排水区における雨天時汚濁負荷流出
シミュレーション・モデル

STORMWATER QUALITY SIMULATION MODEL IN URBAN SEWER SYSTEMS

渡辺政広*・藤田和博**・時尾嘉弘**

Masahiro WATANABE*, Kazuhiro FUJITA**, Yoshihiro TOKIO**

ABSTRACT; Water pollution of the receiving waters that receive combined sewer overflows (CSOs) from urban sewer pipe systems has been deteriorating and spreading recently. The investigation of reasonable measures to prevent or mitigate the water pollution began to be taken up seriously in the early 1970s. The Public Works Research Institute (PWRI), the Ministry of Construction, has developed a water quality simulation model (PWRI Model) in sewered areas during the mid-1970s and early 1980s. This model, which is usually combined with the RRL method modified by the PWRI to evaluate stormwater runoff, is able to simulate practically the phenomenon in which the pollutants, including BOD, COD, and SS, remaining both on surfaces and in sewers are washed off.

The purpose of this paper is to clarify the adaptability of the model and improve or modify the model if necessary. First, the adaptability was investigated on the basis of the comparisons between observed runoff hydrographs, including pollutographs, and simulated ones in an urban drainage basin which area is about 40 ha. As a result, several methodological problems to be solved were indicated. Second, the modification of the model according to the indications resulted in improving the adaptability considerably.

KEYWORDS; PWRI Model, RRL Method, water quality, stormwater runoff, urban sewer system

1. はじめに

合流式下水道排水区域において、雨天時の遮集容量は、 $(3\sim5) \times (\text{計画時間最大汚水量})$ を目標として計画・設計されている。しかしながら、近年における都市化の急速な進行に伴い、各地の合流式下水道排水区域では、晴天時下水量が施設建設当時のそれを大きく上回るまでに増大し、遮集容量が実質的にかなり低下して、計画規模を上回る汚濁雨水が公共用水域に越流する状況が頻繁に発生するようになってきている。さらに、都市化の進展に伴う雨水流出水量の増大は、そうした越流水量の増加に一層の拍車をかけている。

上述した雨天時越流水による公共用水域の水質汚濁を軽減・防止する対策については、1980年代に入って、各地の都市下水道排水区域できめ細かい検討がなされるようになってきているが、これに対応して、下

* 愛媛大学工学部 土木海洋工学科 Department of Civil and Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

** 愛媛大学大学院工学研究科博士前期課程 土木海洋工学専攻 Graduate Course of Civil and Ocean Engineering, Ehime University

水道排水区域を対象とする汚濁負荷流出の解析についても、高精度でしかもミクロな解析が遂行し得る汚濁負荷流出シミュレーション・モデルの開発が重要な課題の一つになってきている。

本論文は、そうした高精度でしかもミクロな解析が遂行し得る汚濁負荷流出シミュレーション・モデルの開発を目指した研究の一環で、今後のモデル開発の有用な基礎資料を得るため、現在、わが国で広く用いられている修正RRL法と土研モデルを組み合わせた雨水流出と汚濁負荷流出のシミュレーション・モデル¹⁾を取り上げ、それらモデルの適用性ならびに適用上の問題点について検討すると共に、それらの適合性を一層向上させるための方向性について検討を行ったものである。

2. 解析対象流域・資料の概要²⁾

解析の対象流域として、Fig. 1 および Table 1 に示す排水区を選んだ。本排水区は、面積 39.5 ha の典型的な商業区域で、区域のおよそ 80 % が不浸透流出面で構成されている。下水管渠システムは、総延長が 1,426 m の幹線管渠とそれらに接続する多数の枝線管渠とからなり、その雨水排除方式は自然排水による合流式である。

解析の対象資料には、本排水区において昭和 50～52 年に観測された、雨天時9出水の降雨・流出（水量、水質）記録および晴天時3回（各1日）の流出（水量、水質）記録を用いた。これら資料の内、晴天時のその概要を Table 2 に示す。

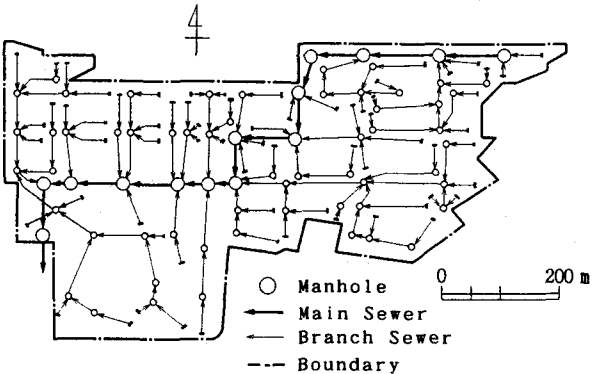


Fig. 1 Research basin and its sewer pipe system.

Table 1 Ground surface and sewer system characteristics of research basin

Drainage Area	39.5 ha
Land Use Zone	Commercial
Impervious Area without Depression Storage	49 %
Impervious Area with Depression Storage	29 %
Pervious Area	22 %
Main Sewer Pipe System	
Diameter	600～1,650 mm
Total Length	1,426 m
Slope	1.3～6.1 %
Branch Sewer Pipe System	
Diameter	300～600 mm
Total Length	9,649 m
Slope	2.6～7.6 %

3. モデルの構成と適用性に関する検討

3.1 シミュレーション・モデルの構成

(1) 雨水流出モデル（修正RRL法）

1) 修正RRL法の概要^{1a), 3)}

修正RRL法は、周知のように、3つのサブ・モデルより構成されている。すなわち、凹地損失および浸透損失を考慮した雨水損失モデル、等到達時間別面積図と有効降雨ハイエトグラフよりインフロー・ハイドログラフを計算する地表面流出モデル、および貯留法によりインフロー・ハイドログラフからアウトフロー・ハイドログラフを計算する管渠流出モデル、の3つのサブ・モデルから構成されている（Fig. 2 参照）。

2) 雨水損失のモデル・パラメータ

上述した排水区に対する雨水損失モデル・パラメータの標準値と

Table 2 Water quality characteristics of 3 dry weather flows

Date	Daily Mass Loading			Daily Average Concentration			Daily Average Discharge	Case
	BOD	COD	SS	BOD	COD	SS		
	(kg/day)			(mg/l)			(m ³ /sec)	
Aug. 27~28, '75	600	250	410	86	35.2	55	0.0745	1
Jun. 17~18, '76	898	358	597	128	50.6	80	0.0785	2
Nov. 14~15, '77	929	437	773	141	65.3	114	0.0690	3

して、既往の観測調査結果⁴⁾をもとに、Table 3 の値を用いることとした。

3) 等到達時間域図と等到達時間別面積率
対象排水区の等到達時間域図および等到達時間面積率をそれぞれ、Fig. 3 および Fig. 4 に示す。なお、排水区内各地点の到達時間 T を算定するにあたり、流下時間 T_c は (距離) ÷ (マンシング型満管等流流速) により算出し、流入時間 T_s は地点によらず一律に 5 分と設定した。

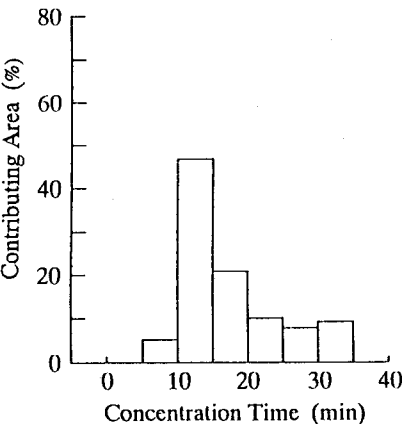


Fig. 4 Contributing area of equal concentration time.

4) S (貯留量) ~ Q (流量) 曲線
対象排水区の $S \sim Q$ 曲線を Fig. 5 に示す。ここで、管渠内貯留量 S の算定にあたり、流れはマンシング型の等流であると仮定した。また、各管渠における流量が満管等流流量を上回るときの貯留量は、各管渠の容積 (= 断面積 × 管渠長) に等しいと仮定した。

なお、Fig. 5 において、 Q が $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲では、計算上、管渠システムの一部に満管流れが現れている。 $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ のとき、満管流れが生じている管渠の貯留量の合計は、管渠システム全体のその 30 % 程度である。

(2) 汚濁負荷流出モデル (土研モデル) ^{1b), 5) - 10)}

1) シミュレーション・モデルの基礎式
土研モデルにおいて、汚濁負荷の発生場は、BOD については管渠内、COD および SS については管渠内と流出面上であるとして取り扱われている。

BOD 負荷の流出に関する基礎式 (運動方程式および連続の式) は、式 (1), (2) のように、COD および SS につ

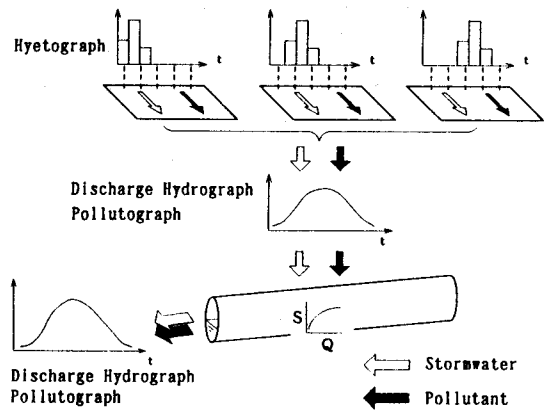


Fig. 2 Conceptual diagram of simulation model.

Table 3 Standard values of rainfall loss parameters

Depression Storage in Impervious Area	2.0 mm
Depression Storage in Pervious Area	6.0 mm
Infiltration Capacity in Pervious Area	5.0 mm/hr

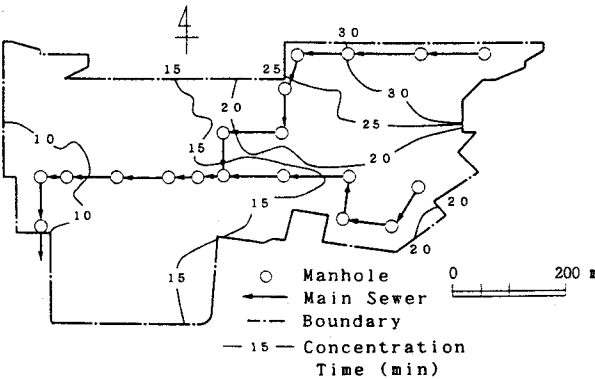


Fig. 3 Contour map of equal concentration time.

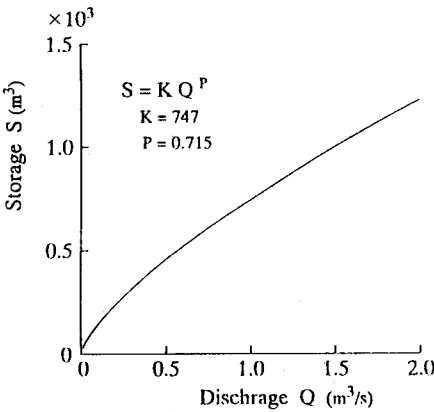


Fig. 5 $S \sim Q$ curve.

いては、それぞれ、式 (3)～(8) および式 (9)～(14) のように表されている。

ここに、添字 B, C および S は、それぞれ、BOD, COD および SS に、添字 D および W は、それぞれ、管渠内および流出面上に関する諸量であることを示す。

$$\text{i) BOD} \quad \text{運動方程式 (管渠内)} : L_{DB} = C_{DB} \cdot P_{DB}^2 \cdot (Q - Q_c) \quad (1)$$

$$\text{連続の式 (管渠内)} : dP_{DB}/dt = D_{DB} - L_{DB} \quad (2)$$

$$\text{ii) COD} \quad \text{運動方程式 (管渠内)} : L_{DC} = C_{DC} \cdot P_{DC}^2 \cdot (Q - Q_c) \quad (3)$$

$$\text{(流出面)} : L_{WC} = (1/3.6) \cdot C_{WC} \cdot P_{WC}' \cdot (r_e - r_{ec}) \cdot A_w \quad (4)$$

$$\text{連続の式 (管渠内)} : dP_{DC}/dt = D_{DC} - L_{DC} + L_{WC} \quad (5)$$

$$\text{(流出面)} : dP_{WC}/dt = D_{WC} - L_{WC} \quad (6)$$

$$; D_{WC} = D_{WC}' \cdot A_w \quad (7)$$

$$; P_{WC} = 1000 \times P_{WC}' \cdot A_w \quad (8)$$

$$\text{iii) SS} \quad \text{運動方程式 (管渠内)} : L_{DS} = C_{DS} \cdot P_{DS} \cdot Q \cdot (Q - Q_c) \quad (9)$$

$$\text{(流出面)} : L_{WS} = (1/3.6) \cdot C_{WS} \cdot P_{WS}' \cdot (r_e - r_{ec}) \cdot A_w \quad (10)$$

$$\text{連続の式 (管渠内)} : dP_{DS}/dt = D_{DS} - L_{DS} + L_{WS} \quad (11)$$

$$\text{(流出面)} : dP_{WS}/dt = D_{WS} - L_{WS} \quad (12)$$

$$; D_{WS} = D_{WS}' \cdot A_w \quad (13)$$

$$; P_{WS} = 1000 \times P_{WS}' \cdot A_w \quad (14)$$

ここに、 L_{DB} , L_{DC} , L_{WC} , L_{DS} , L_{WS} : 発生負荷量 (gr/s), C_{DB} , C_{DC} , C_{DS} , C_{WC} , C_{WS} : 負荷流出係数 ($1/\text{gr}/\text{m}^3$, $1/\text{gr}/\text{m}^3$, s/m^6 , $1/\text{mm}$, $1/\text{mm}$), P_{DB} , P_{DC} , P_{WC} , P_{DS} , P_{WS} : 堆積負荷量 (gr), P_{WC}' , P_{WS}' : 単位面積当りの堆積負荷量 (kg/ha), D_{DB} , D_{DC} , D_{WC} , D_{DS} , D_{WS} : 補給負荷量 (gr/s), D_{WC}' , D_{WS}' : 単位面積当りの補給負荷量 (gr/s/ha), A_w : 降雨による負荷発生に関与する面積 (ha), Q : 修正 RRL 法による計算流量 (m^3/s), Q_c : 限界流量 (m^3/s), r_e : 有効降雨強度 (mm/hr), r_{ec} : 限界有効降雨強度 (mm/hr), t : 時間 (s)。

ここで、流出面上における汚濁負荷流出の追跡は、Fig. 2 から明らかなように、等到達時間域ごとに、時間遅れを考慮して進められ、結果として、管渠システムへ流入するポルトグラフが計算されることになる。すなわち、上式中の A_w は、通常は、各等到達時間域における不浸透流出面の面積となる。

一方、中村⁶⁾は、計算流量 Q から逆算した有効降雨強度 r_e を用いる実用的な追跡法を提案している。すなわち、上式 (4), (5) および (10), (11) に変えて、次式 (15)～(17) および (18)～(20) を用いる。

$$\text{運動方程式 (管渠内)} : L_C = L_{DC} + L_{WC} \quad (15)$$

$$L_{WC} = (1/3.6) \cdot C_{WC} \cdot P_{WC}' \cdot (r_e - r_{ec}) \cdot A_w \quad ; r_e = (Q - Q_c) / A / 360 \quad (16)$$

$$\text{連続の式 (管渠内)} : dP_{DC}/dt = D_{DC} - L_{DC} \quad (17)$$

$$\text{運動方程式 (管渠内)} : L_S = L_{DS} + L_{WS} \quad (18)$$

$$L_{WS} = (1/3.6) \cdot C_{WS} \cdot P_{WS}' \cdot (r_e - r_{ec}) \cdot A_w \quad ; r_e = (Q - Q_c) / A / 360 \quad (19)$$

$$\text{連続の式 (管渠内)} : dP_{DS}/dt = D_{DS} - L_{DS} \quad (20)$$

ここに、 L_C , L_S : 発生負荷量 (gr/s), A : 排水区面積 (ha)。

2) 管渠内パラメータの算定法

雨天時の汚濁負荷流出シミュレーションに先立ち、管渠内よりの汚濁負荷流出に関するパラメータ、すなわち、負荷流出係数 C_{DB} , C_{DC} , C_{DS} および 初期堆積負荷量 $P_{DB,o}$, $P_{DC,o}$, $P_{DS,o}$ の適値を算定しておく必要がある。

以下に、文献 1b) に従い、それら適値の算定手順を手短に示す。

i) C_{DB} および $P_{DB,o}$

① $P_{DB,o} = (1/2) \times (\text{晴天時の1日 BOD 発生負荷量 (gr)})$ とする。

② C_{DB} の近似値 C_{DB}' を、次式

$$(\text{晴天時のピーク BOD 濃度}) = C_{DB}' \times P_{DB,o}^2$$

より推算する。

③ 上の C_{DB}' と $P_{DB,o}$ を用い、晴天時の汚濁負荷流出シミュレーションを行う。

④ シミュレーションの初期値 $P_{DB,o}$ にかかわらず、堆積負荷量 P_{DB} は一定値 P_{DB}^* に収束してくる。

⑤ 求める適値 C_{DB} を、 $C_{DB}' \times P_{DB}^{*2} = C_{DB} \times P_{DB,o}^2$ より算定する。

ii) C_{DC} および $P_{DC,o}$

算定法の考え方、手順ともに上記 i) と同様であり、ここでは、説明を省略する。

iii) C_{DS} および $P_{DS,o}$

算定法の考え方、手順ともに、下記の ② を除いて、上記 i) と同様である。

② C_{DS} の近似値 C_{DS}' を、次式

$$(\text{晴天時の日平均 SS 濃度}) = C_{DS}' \times P_{DS,o} \times \{ \text{日平均 (流量-限界流量)} \}$$

より推算する。

3) 流出面パラメータの算定法

土研モデルにおいて、流出面パラメータ、すなわち、負荷流出係数 C_{WC} , C_{WS} および初期堆積負荷量 $P_{WC,o}$, $P_{WS,o}$ の算定法は、

これまでのところ特に明らかにされていない。

ここでは、それらパラメータの適値として、Table 4 に示す既往の研究結果⁷⁾を利用することとした。

なお、雨天時の補給負荷量 D_{WC} および D_{WS} について、一般には、これらを無視して取り扱ってよいと考えられ⁷⁾、こ

こでも、そのように取り扱うこととした。

3.2 適用性と適用上の問題点に関する検討^{10), 11)}

(1) 修正RRL法について

前述した対象排水区の9出水について、修正RRL法による雨水流出シミュレーション結果を実測結果と対比して、本法の適用性を検討した。検討結果の一例を、Fig. 6 および Fig. 7 に示す。なお、これらの図中には、比較検討のため、欧米諸国で現在も広く用いられている SWMM-TRANSPORT モデル¹²⁾によるシミュレーション結果¹³⁾を併示している。

これらより、修正RRL法の適用性と適用上の問題点について、以下の諸点が指摘された。

① 修正RRL法による流出シミュレーション結果には、10~15 分程度の時間遅れが現われる傾向が見られる。

Table 4 Standard values of initial surface load and washoff coefficient for surface runoff

Source	BOD		COD		SS	
	$P_{WB,o}$ (kg/ha)	C_{WB} (1/mm)	P_{WC} (kg/ha)	C_{WC} (1/mm)	$P_{WS,o}$ (kg/ha)	C_{WS} (1/mm)
Roof	0.2	0.25~0.30	0.3	0.25~0.30	2.2	0.50~0.65
Road Surface						
Residential Area	3	0.10~0.12	7	0.09~0.13	10	0.13~0.16
Commercial Area	12	0.10~0.20	16	0.10~0.12	24	0.10~0.20
Industrial Area	5	0.08~0.10	8	0.07~0.10	10	0.06~0.13

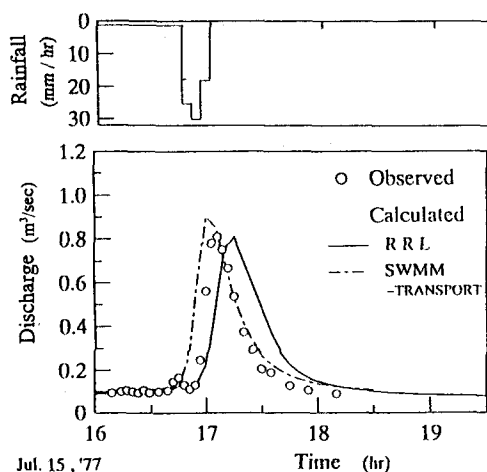


Fig. 6 Comparison between simulated and observed discharge hydrographs (Jul. 15, 1977).

② しかし、この点を除けば、計算ハイドログラフの流出特性は実測結果のそれをよく再現していると言える。

③ 上述の時間遅れの原因の1つとして、管渠内における雨水の流下時間の算定に、雨水の伝播速度 ω ではなくマニング型の満管等流流速 V_{full} を用いている（一般に、 $\omega > V_{full}$ ）ことが考えられる。

(2) 土研モデルについて

1) 管渠内パラメータの算定法について

上の 3.1 (2) 2) で述べた算定法に基づき、2. で示した3晴天時データのそれぞれについて、管渠内パラメータの適値の算定を行った。算定結果について、ここでは、Table 2 の晴天時データ・Case 2 を対象とするときの BOD に関する結果を中心に述べる。

先の9出水に対する BOD の晴天時ピーク濃度を調べると、それらは 100~300 mg/l の範囲にあった。そこで、ピーク濃度別に C_{DB} の適値を算定した。算定結果の一例を Table 5 に示す。

これらより、負荷流出係数 C_{DB} 、 C_{DC} および C_{DS} の適値の算定に際し、晴天時ピーク濃度（BOD、COD）および晴天時日平均濃度（SS）の違いはそれら適値の算定結果に何ら影響を及ぼさないこと、したがって、晴天時ピーク濃度および晴天時日平均濃度の値として、晴天時に観測される適当な値を採用すればよいことが分かる。

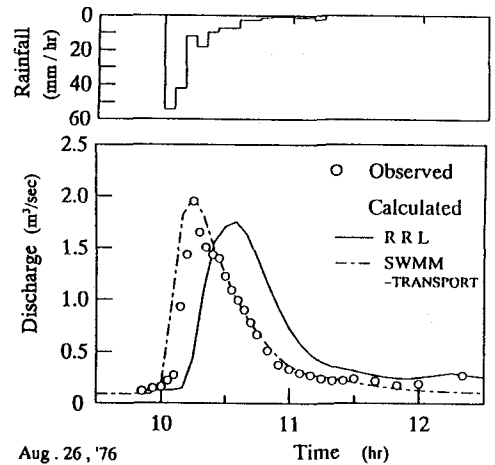
2) 雨天時汚濁負荷流出シミュレーションの適用性

上で算定した管渠内パラメータ（Table 5）、流出面パラメータの標準値（Table 4）および晴天時データ（Table 2）をもとに、前述の9出水を対象として雨天時汚濁負荷流出シミュレーションを行い、これらシミュレーション結果を実測結果と対比して土研モデルの適合性を調べた。晴天時データ・Case 2 を用いたときの検討結果の一例を、Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

ここに、汚濁負荷流出シミュレーションに先立つ修正 RRL 法による雨水流出シミュレーションにおいて、3.2 (1) の ① で指摘した実測ハイドログラフに対する計算ハイドログラフの時間遅れが発生しないよう、降雨データの入力を予め 10~15 分程度早めている。また、本汚濁負荷流出シミュレーションにおいて、基礎式 (1)~(14) を用いる場合を Type a-2、一部で式 (15)~(20) の計算流量 Q から逆算した有効降雨強度 r_e を用いる場合を Type a-1 と表している。

これらより、BOD、COD および SS のいずれについても、また Type a-1 および a-2 のどちらを用いても、土研モデルにより、全般的には、十分に実用し得る精度のシミュレーション結果の得られることが分かる。しかし、詳細にみると、シミュレーション結果は実測結果に比べて全体的にやや扁平化してくる、ポルトグラフの低減部の減少が全般的にやや急激である、などの傾向が見られる。

次いで、晴天時データの違い（Table 2）による管渠内パラメータの適値の違い（Table 6）が雨天時シミュレーション結果にどのような影響を及ぼすかについて検討した。検討結果の一例を Fig. 10 に示す。



Aug. 26, '76

Fig. 7 Comparison between simulated and observed discharge hydrographs (Aug. 26, 1976).

Table 5 Evaluated values of initial load and washoff coefficient in sewer system

$P_{DB,0}$ (kg)	Peak Concentration (mg/l)	C_{DB} $\times 10^{-9}$ (1/g·m³)	P_{DB} (kg)	C_{DB} $\times 10^{-9}$ (1/g·m³)
449	100	0.496	648	1.04
449	200	0.992	461	1.05
449	300	1.49	378	1.05

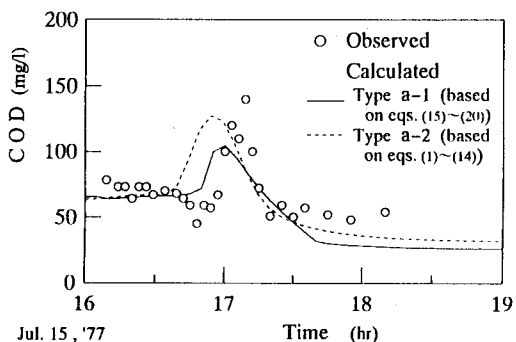


Fig. 8 Comparison between observed and simulated COD pollutographs.

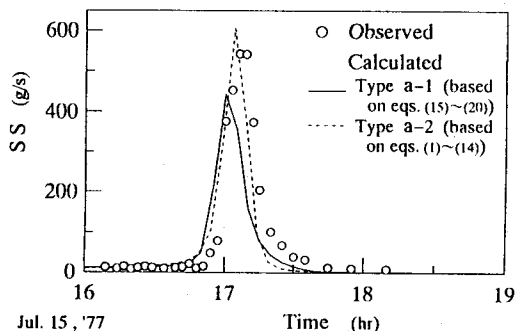


Fig. 9 Comparison between observed and simulated SS pollutographs.

Table 6 Evaluated values of initial load and washoff coefficient for 3 dry weather flows

Case	BOD		COD		SS	
	$C_{DB} \times 10^{-9}$ (1/g/m ³)	$P_{DB,0} \times 10^5$ (g)	$C_{DC} \times 10^{-9}$ (1/g/m ³)	$P_{DC,0} \times 10^5$ (g)	$C_{DS} \times 10^{-3}$ (1/mm)	$P_{DS,0} \times 10^5$ (g)
1	1.43	3.00	3.44	1.25	3.90	2.05
2	1.05	4.49	2.62	1.79	4.41	2.99
3	1.04	4.65	2.17	2.19	5.75	3.87

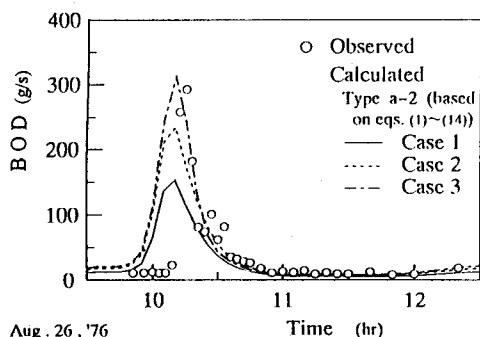


Fig. 10 Comparison between observed and simulated BOD pollutographs.

ここに、修正RRL法による計算ハイドログラフに
対し上と同様の措置を施すと共に、Type a-2 によ
る汚濁負荷流出シミュレーションを行っている。

これらより、BOD、COD および SS のいずれについても、採用した晴天時データの違いによる管
渠内パラメータの適値の違いは、汚濁負荷流出シミュレーション結果に実用上からも無視しえない程度の影響
を及ぼす可能性のあることが指摘される。

4. モデルの改良と適用性の向上に関する検討

4.1 修正RRL法について

先の 3.2 (1) において指摘した時間遅れを改善するため、 V_{full} の代わりに、流れの伝播速度 ω を用
いる。今、流れが kinematic wave であるとする、 ω は次式のように表される。

$$\omega = \frac{dQ_n}{dF} = V + F \cdot \frac{dV}{dF} = \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\theta (1 - \cos \theta)} \right) \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\theta} \right)^{2/3} \cdot V_{full} \quad (21)$$

$$; V_{full} = (1/n) \cdot (D/4)^{2/3} \cdot \sqrt{S_0}, \quad \theta = 2 \cdot \arccos \{1 - 2 \cdot (h/D)\} \quad (22)$$

ここに、 D 、 S_0 、 n ：管渠の直径、こう配、粗度係数、 Q_n ：等流量、 F ：流水断面積、 V ：等流速、 h ：
等流水深、 θ ：流水断面の中心角。

上式より、 $h/D \approx 0.3 \sim 0.8$ の範囲で、 $\omega \approx (1.1 \sim 1.4) \times V_{full}$ となる。しかしながら、実際の
下水管渠システムでは、低下背水やせき上げ背水を伴う流れ、満管流れなどが発生していることも十分に考
えられ、したがって、 ω を上のように単純に決定することは困難である。

ここでは、前述した時間遅れがほぼ改善されるときの流れの流達時間を T' と定義し、次式

$$T' = (T_s + T_c) / \beta \quad (23)$$

を満たす係数 β を対象排水区における先の9出水について調べた。具体的には、まず、 β を 1.0~3.0 (きざみ 0.2) まで変化させ、11 種の等到達時間面積率図を作成した。

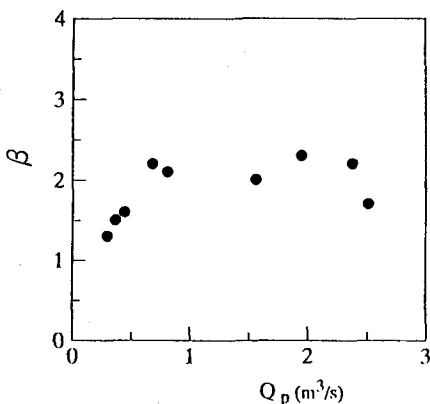


Fig. 11 Relationship between β and peak discharge Q_p .

次いで、9 出水それぞれについて、それら面積

率図を用いた流出シミュレーションを行って β の適値を見出した。この検討結果を、Fig. 11 に示す。

これより、下水管渠システムで満管流れや顕著な背水現象が発生していないと考えられる中・小出水（ピーク流量 Q_p がおよそ $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下）では $\beta \approx 1.5 \sim 2$ 、それらが発生していることも考えられる大出水では $\beta \approx 2$ となっているが、実用上からは、 $\beta \approx 2$ 一定としてよい結果が得られていると言えよう。

なお、 $\beta = 2$ のときの等到達時間面積率図を Fig.

12 に、これによるシミュレーション結果 (Improved) の一例を改良前の結果 (Existing) と対比して Fig. 13 に示す。また、Fig. 13 中には、 $T_s = 0$ とするときの改良前のシミュレーション結果を併示している。これ

らより、式 (23) における β 値として、対象排水区に関する限り、2 程度を採用すれば、時間遅れの問題を概ね改善できるであろうことが分かる。

4.2 土研モデルについて

(1) 改良の概要

先の 3.2 (2) 2) で示したように、土研モデルの適用性および適合性は、実用上からは、十分なものであると言えるが、ここでは、土研モデル (Type a-2) に対してよりミクロな解析手法を組み入れ、その適用性および汎用性を一層向上させるための方向性についての検討を進める。具体的には、排水区域内の各所に貯留施設や制御施設が設置される場合、また都市化の進行によって排水区域内での土地利用形態が大きく異なりかつ不均一である場合などの汚濁負荷流出シミュレーションが遂行しえるモデルを想定し、土研モデルの解析手法に対して新たに以下のような幾つかの概念を導入する (Fig. 14 参照)。

- ① 排水区域を、等到達時間域と雨水排水系統を考慮し、幾つかのサブ流域に分割する。
- ② 雨水流出および汚濁負荷流出の追跡計算は、サブ流域を単位として遂行する。
- ③ これらにより、排水区域内の各所に各種の貯留施設や制御施設が設置される場合の解析が可能となる。

また、排水区域内における堆積負荷や雨水損失などの場所的分布を考慮した取り扱いも可能となる。

- ④ 流出面上から流出して下水管渠に流入し流下する汚濁負荷成分は、本来、浮遊を主体として流下する

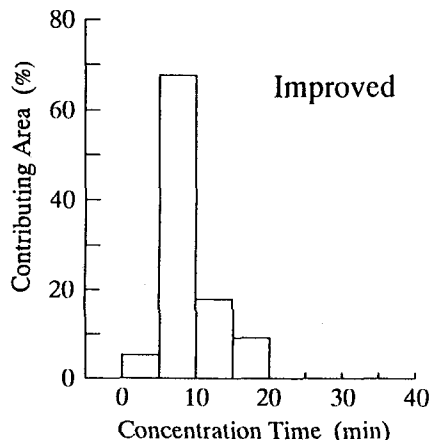


Fig. 12 Contributing area of equal concentration time.

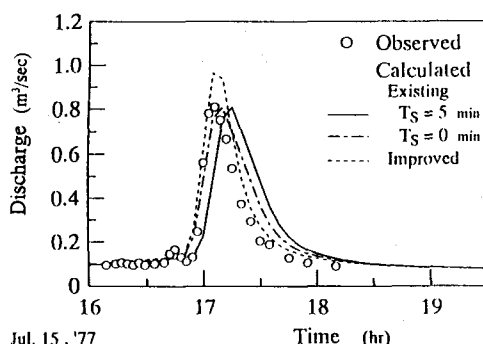


Fig. 13 Comparison between simulated and observed discharge hydrographs (Jul. 15, 1977).

成分と堆積しながら掃流される成分とからなると考えられる。そこで、流出面上から管渠に流入した COD および SS については、一部は浮遊する汚濁負荷成分に、他は堆積し掃流される汚濁負荷成分になるとして取り扱うこととする。

- ⑤ また、浮遊する汚濁負荷は、実用上の立場から、完全混合されるとして取り扱うこととする。

なお、上記 ④ において、本来は、補給負荷についても浮遊成分と掃流成分に分けて取り扱うべきと考えられるが、ここでは、浮遊成分を考慮する取り扱いの手始めとして、流出面上から流出する汚濁負荷に対してのみそうした取り扱いを適用するケースについて検討することとした。また、上記 ⑤ の完全混合型は、SWMM モデル¹²⁾においても採用されているように、今後、浮遊と掃流との相互関係、すなわち、巻き上げ・沈殿現象を導入しようとする際に好都合となる。

(2) モデルの基礎式

本モデルの基礎式を以下に示す。ここに、雨水および汚濁負荷の追跡計算は、上述したように、サブ流域ごとに遂行されることになる (Fig. 14 参照)。

i) BOD 運動方程式 (管渠内) : $L_{DB} = C_{DB} \cdot P_{DB}^2 \cdot (Q - Q_c)$ (24)

連続の式 (管渠内) : $dP_{DB}/dt = D_{DB} - L_{DB} + \Sigma(L_{DB})$ (25)

ii) COD 運動方程式 : $L_c = L_{DC} + L'_{WC}$ (26)

(管渠内・堆積) : $L_{DC} = C_{DC} \cdot P_{DC}^2 \cdot (Q - Q_c)$ (27)

(管渠内・浮遊) : $L'_{WC} = Q \cdot C'_{WC}$ (28)

(流出面) : $L_{WC} = (1/3.6) \cdot C_{WC} \cdot P_{WC}^2 \cdot (r_e - r_{ec}) \cdot A_w$ (29)

連続の式 (管渠内・堆積) : $dP_{DC}/dt = D_{DC} - L_{DC} + (1 - \alpha) \cdot L_{WC} + \Sigma(L_{DC})$ (30)

(管渠内・浮遊) : $d(S \cdot C'_{WC})/dt = \alpha \cdot L_{WC} - Q \cdot C'_{WC} + \Sigma(L'_{WC})$ (31)

(流出面) : $dP_{WC}/dt = D_{WC} - L_{WC}$ (32)

; $D_{WC} = D_{WC}' \cdot A_w$ (33)

; $P_{WC} = 1000 \times P_{WC}' \cdot A_w$ (34)

iii) SS 運動方程式 : $L_s = L_{DS} + L'_{WS}$ (35)

(管渠内・堆積) : $L_{DS} = C_{DS} \cdot P_{DS}^2 \cdot Q(Q - Q_c)$ (36)

(管渠内・浮遊) : $L'_{WS} = Q \cdot C'_{WS}$ (37)

(流出面) : $L_{WS} = (1/3.6) \cdot C_{WS} \cdot P_{WS}^2 \cdot (r_e - r_{ec}) \cdot A_w$ (38)

連続の式 (管渠内・堆積) : $dP_{DS}/dt = D_{DS} - L_{DS} + (1 - \alpha) \cdot L_{WS} + \Sigma(L_{DS})$ (39)

(管渠内・浮遊) : $d(S \cdot C'_{WS})/dt = \alpha \cdot L_{WS} - Q \cdot C'_{WS} + \Sigma(L'_{WS})$ (40)

(流出面) : $dP_{WS}/dt = D_{WS} - L_{WS}$ (41)

; $D_{WS} = D_{WS}' \cdot A_w$ (42)

; $P_{WS} = 1000 \times P_{WS}' \cdot A_w$ (43)

ここに、 $\Sigma(L_{DB})$, $\Sigma(L_{DC})$, $\Sigma(L_{DS})$: 上流管渠からの堆積成分としての流入負荷量 (gr/s), L'_{WC} , L'_{WS} : 浮遊成分としての発生負荷量 (gr/s), C'_{WC} , C'_{WS} : 管渠内貯留水の濃度 (mg/l), S : 管渠内

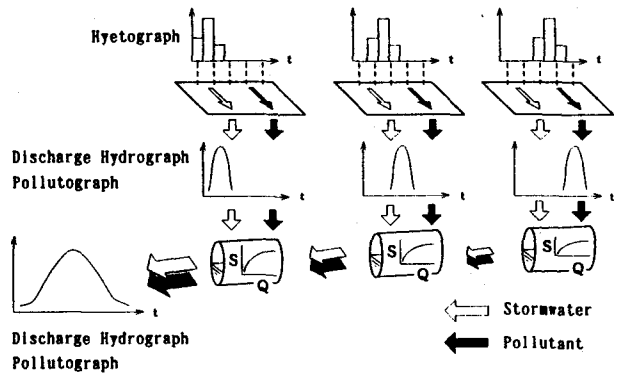


Fig. 14 Conceptual diagram of improved simulation model.

貯留水量 (m^3), α : 係数 ($\alpha=1$ のとき全てが浮遊成分, $\alpha=0$ のとき全てが掃流成分となる)。

(3) 管渠内パラメータの算定法

上の改良モデルにおける管渠内パラメータの算定法を 3.1 (2) 2) の従来の算定法と対比し、留意すべき点をまとめると、以下のようである。

- ① サブ流域の単位で適用される点を除けば、考え方は 3.1 (2) 2) の算定法のそれとほぼ同様である。
- ② 管渠システム全体における管渠内初期堆積負荷量は、これまでと同様、
(1/2) × (晴天時の 1 日発生負荷量 (gr)) とする。
- ③ 各サブ流域の管渠システムにおける管渠内初期堆積負荷量は、サブ流域の面積に比例すると仮定する。

(4) 適用性の検討

はじめに、対象排水区を、等到達時間域図 (Fig. 3) および排水系統 (Fig. 1) を勘案し、Fig. 15 に示すように、12 のサブ流域に分割した。すなわち、同一の等到達時間域の中に、雨水の流下ルートが異なるとして取り扱った方がよいと考えられる幾つかの主要な管渠ルートがある場合には、その等到達時間域をそれら管渠ルートに応じて細分割する方法により、12 のサブ流域を構成した。

次に、前述した 9 出水を対象に、モデル・パラメータの算定を行って後、基礎式 (24)~(43) を用いる改良モデルによる流出シミュレーション (Type b) を行い、これらを実測結果および従来のモデルによる結果 (Type a-2) と対比して、本モデルの適用性を検討した。検討結果の例を、Fig. 16~19 に示す。

なお、修正 RRL 法による雨水流出シミュレーションにおいて、3.2 (1) で指摘した時間遅れを修正するため、ここでは、降雨データを 10~15 分程度早めにインプットしている。

これらより、改良モデルの適用性について、以下の諸点が指摘された。

- ① 本モデルによる汚濁負荷流出のシミュレーション結果 ($\alpha = 0$) を従来のそれと対比すると、Fig. 16 および Fig. 17 から明らかなように、ポルトグラフの流出応答がより鋭敏となる傾向が見られる。
- ② 本モデル ($\alpha = 0$) の適合度は、Fig. 16 および Fig. 17 から明らかなように、全般的には、従来のモデルのそれとほぼ同程度であると言える。
- ③ Fig. 15 および Fig. 18 に示すように、本モデルによれば、管渠システムにおける各主要地点での水量・水質の流出状況を把握することが可能となる。
- ④ 流出面上から流出して管渠に流入した汚濁負荷の浮遊成分としての取り扱いを増加させる (α を大きくする) につれ、Fig. 19 から明らかなように、ポルトグラフの扁平化が次第に顕著となる。
これは、浮遊成分としての汚濁負荷が増加するにつれ、下水管渠システム内での完全混合による汚濁濃度の均一化の効果が次第に顕著となることによると考えられる。

- ⑤ また、こうした浮遊成分としての取り扱いを導入することにより、従来のモデルによるポル

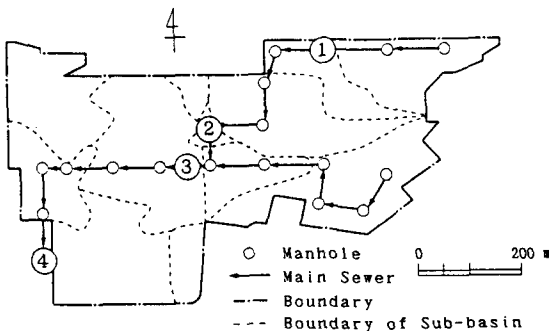


Fig. 15 Subdivision of research basin.

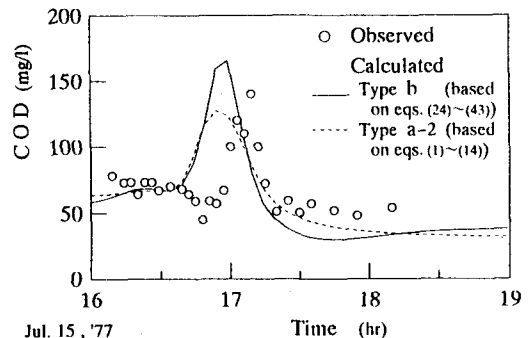


Fig. 16 Comparison between observed and simulated BOD pollutographs.

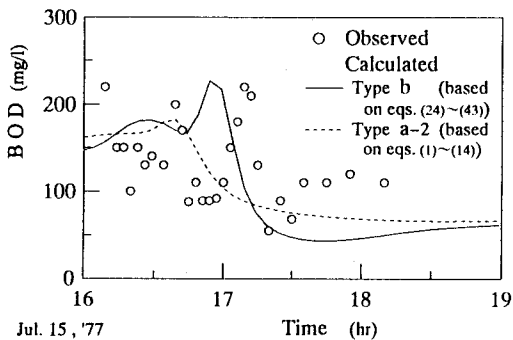


Fig. 17 Comparison between observed and simulated COD pollutographs.

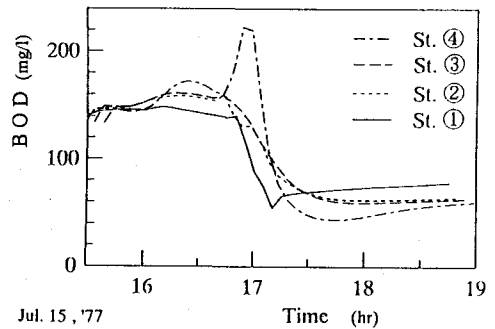


Fig. 18 Comparison between simulated BOD pollutographs at 4 stations.

ートグラフの低減部において見られた急激な減衰傾向を改善し得るであろう見通しが得られた。

5. 結論

本論文は、高精度でしかもミクロな解析が遂行し得る汚濁負荷流出シミュレーション・モデルの開発を目指した研究の一環で、ここでは、現在、わが国で広く用いられている土研モデルを取り上げ、対象排水区 ($A=39.5$ ha) を設定して、その適用性ならびに適用上の問題点などについて検討すると共に、本モデルの適合性を一層向上させるための方向性についても検討を加えた。以下に主要な結果を要約する。

1) まず、雨水流出モデルである修正RRL法の適用性について検討し、10~15分程度の時間遅れが見られる傾向が見られる点を除けば、本法により十分に実用しえる雨水流出シミュレーション結果の得られることが確かめられた。また、対象排水区に関する限り、流入時間と流下時間を共に従来の算定法により得られる値の1/2程度に設定して流出シミュレーションを行うとき、そうした時間遅れを概ね改善できることも確かめられた。

2) 次に、汚濁負荷流出モデルである土研モデルの適用性について検討を進めた結果、以下の諸点を指摘することができた。① 管渠内パラメータの算定法において、晴天時ピーク濃度の違いがそれらの適値に及ぼす影響は無視し得る程度である。② 晴天時データのの違いに起因する管渠内パラメータの適値の違いが雨天時シミュレーション結果に及ぼす影響は、実用上からも、無視し得ない程度にまでのぼる。③ 土研モデルによれば、実用上の立場からは、十分な精度をもつ流出シミュレーション結果が得られると言える。

3) さらに、土研モデルに幾つかの改良を加え、本改良モデルの適用性を検討したところ、次の知見を得た。① 排水区を幾つかのサブ流域に分割し、サブ流域の単位で水量・水質の追跡計算を遂行する方式によって得られるポルトグラフの流出応答は、従来の土研モデルのそれに比べてより鋭敏となる。② 管渠内における汚濁負荷の流出について、浮遊成分を考慮する取り扱いを導入することにより、土研モデルの適合度を一層改善できるであろう見通しが得られた。③ 本モデルによれば、流域内の各主要地点における水量・水質の流出状況を把握できる。

なお、今後は、修正RRL法および土研モデルを他の幾つかの排水区にも適用し、それらの適用性および適用上の問題点 (β 値、晴天時データと管渠内パラメータの適値との関係、など) についてより詳細な検

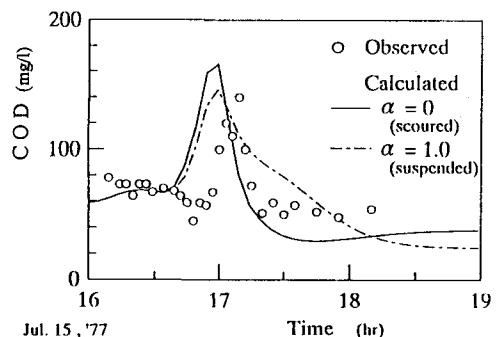


Fig. 19 Comparison between observed and simulated COD pollutographs.

討を進めると共に、土研モデルの改良の方向性（浮遊成分の取扱い、完全混合型モデル、など）についても一層詳細な考察・検討を加える必要がある。

最後に、本研究を推進するにあたり、近畿大学理工学部土木工学科・江藤剛治教授、建設省土木研究所下水道部・榑原 隆氏より多くの貴重な助言を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) (社)日本下水道協会：合流式下水道越流水対策と暫定指針 -1982年版-，a) pp. 22~32, b) pp. 49~68, 1982.
- 2) 建設省土木研究所下水道研究室：土木研究所資料第1478号 -合流式下水道の雨天時下水に関するデータベース（その1：自然排水区）-，1979.
- 3) Terstriep, M. L. and J. B. Stall : Urban runoff by Road Research Laboratory method, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 95, No. HY6, pp. 1809~1834, 1969.
- 4) 渡辺政広・豊國永次：都市域の流出解析（2）-流域特性のモデル化と流出解析-，自然災害科学，8巻3号，pp. 46~63, 1989.
- 5) 山口高志：雨天時合流式下水道からの汚濁流出シミュレーション -都内谷端川排水区の場合-，土木技術資料，Vol. 18, No. 2, pp. 15~20, 1976.
- 6) 中村栄一：都市流出水による汚濁流出シミュレーション -雨天時合流式下水道からのCOD流出-，土木技術資料，Vol. 23, No. 5, pp. 3~8, 1981.
- 7) 虫明巧臣・石崎勝義・吉野文雄・山口高志：水環境の保全と再生，山海堂，pp. 213~ 232, 1987.
- 8) 酒井 彰・平井真砂郎・張 昇平：都市雨水排除系からの汚濁負荷流出特性，環境工学研究論文集，第30巻，pp. 101~110, 1993.
- 9) 中村栄一：雨水流出水による汚濁負荷の流出特性，下水道協会誌論文集，Vol. 30, No. 364, pp. 1~13, 1993.
- 10) 渡辺政広・藤田和博・時尾嘉弘：都市下水道流域の汚濁負荷流出モデル，愛媛大学工学部紀要，第13巻，pp. 251~260, 1994.
- 11) 渡辺政広・藤田和博・時尾嘉弘：都市下水道流域における汚濁負荷流出モデルの適用性に関する検討，水文・水資源学会1993年研究発表会要旨集，pp. 124~125, 1993.
- 12) Huber, W. C. et al. : Storm Water Management Model; Ver. 4 -- Part A; User's Manual, U.S. EPA/600/3-88/001a, 1988.
- 13) 渡辺政広・時尾嘉弘・近藤 崇：SWMM-RUNOFF-TRANSPORT モデルによる汚濁負荷の流出シミュレーション（2），平成6年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 298~299, 1994.