

(8) 合流式下水道流域における雨天時汚濁負荷流出の 分布型非定常解析モデル

A new distributed runoff model of water quality and storm water in combined sewer pipe systems

渡辺政広*, 永吉光一**, 岡田将人**

Masahiro WATANABE*, Koichi NAGAYOSHI**, Masato OKADA**

ABSTRACT; Combined sewer overflows (CSOs) have made water quality of receiving water bodies, including rivers and lakes, worse year by year. A new distributed runoff simulation model of storm water and pollutants in urban sewer pipe systems, which can be used to investigate appropriate counter measures for the CSOs and evaluate the effects of the measures, is proposed. In this model, PWRI Model, which is a lumped model and was proposed by the Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan, is improved to a distributed model and used to simulate pollutant runoff. SLOT Model, which can treat both open-channel and pressurized flows, is employed to simulate stormwater runoff with surcharge.

The distributed model was applied to a combined sewer pipe system with a pumping station and the applicability of the model was investigated on the basis of the comparison of simulated pollutographs and observed ones. As a result, it was pointed out that the model is very useful and practical one and can reproduce well runoff characteristics of stormwater and pollutants in combined sewer pipe systems with pumping stations.

KEYWORDS; SLOT Model, PWRI Model, distributed runoff model, water quality, combined sewer pipe

1. はじめに

近年、都市域の合流式下水道管渠システムからの雨天時越流水による河川、湖沼、内湾などの公共用水域の水質の悪化が問題となってきた。

こうした越流水を軽減・防止する諸対策の中でも、下水道管渠システム内での流れの制御を伴う諸対策を立案し、それらの効果を正確に予測するには、流域の地表面と下水道管渠システムにおける雨水と汚濁負荷の流出を時空間的に詳細に取り扱い得る分布型の流出モデルが必要となる。

わが国における汚濁負荷流出（モデル）に関する既往の研究を概観すると、修正 RRL 法¹⁾と組み合わせで用いられ、わが国では 1980 年代の始めより広く利用されてきている土研モデル²⁾、和田ら³⁾の地表面と管渠システムをそれぞれ集中化して取り扱う分流式下水道流域の汚濁負荷流出モデル、海老瀬⁴⁾の年間総流出負荷量を算定するための統計的回帰モデルなど、いくつものモデルが提案されてきている。しかし、これらはいずれも集中型の流出モデルであり、これらモデルによって、今後、上述した下水道管渠システム内での流れの制御を伴う諸対策について詳細な検討を進めるには限界がある。

* 愛媛大学工学部 環境建設工学科 (Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University)

** 愛媛大学大学院理工学研究科 土木海洋工学専攻 (Graduate Course of Civil and Ocean Engineering, Ehime University)

本研究は、そうした越流水問題に適用し得る分布型の流出解析モデルを開発しようとする研究の一環である。本論文では、はじめに、地表面上の雨水追跡に合理法、下水道管渠システムにおける雨水流出水の追跡にスロット・モデル^{5), 6)}、地表面および下水道管渠システムにおける汚濁負荷流出の追跡に分布型土研モデル⁷⁾を適用し、雨水流出と汚濁負荷流出の非定常追跡計算を行う分布型流出解析モデルを提示する。次いで、本モデルを低平地域の一ポンプ排水区に適用し、その実流域への適用性について検討した結果を述べる。

なお、本論文では、従来の土研モデルを「集中型 (lumped) 土研モデル」、分布型へと改良した土研モデルを「分布型 (distributed) 土研モデル」と呼ぶこととする。

2. 分布型流出解析モデルの構成

本解析モデルは、Fig. 1 に示すように、

- 流域モデリング、
- 雨水損失 (有効降雨) モデル、
- 雨水流出モデル、
- 汚濁負荷流出モデル、

の 4 つのサブ・モデルから構成されている。

(1) 流域モデリング

流域が多数の単位排水区からなるとしてモデル化する。ここに、単位排水区は、Fig. 2 に示すように、上流マンホール、下水管渠、およびそれらの直接集水域から構成されている。

なお、単位排水区の面積、地表面における各種流出面 (屋根、道路、裸地など) の諸量 (占有面積、こう配、粗度など)、また、上流マンホールと下水管渠の諸元 (直径、こう配、段差など) は、いずれも、基本的には、単位排水区ごとに異なるとして取り扱う。

(2) 雨水損失 (有効降雨) モデル¹⁾

有効降雨の算定には、修正 RRL 法における算定法を採用する。すなわち、まず、各種流出面を、雨水損失の無い不透水性流出面、凹地損失のある不透水性流出面、凹地損失と浸透損失のある浸透性流出面の 3 種に分類する。次に、凹地損失は、降雨が凹地を満たして後に流出が始まるとして、また、浸透損失は、最終浸透能を下回る強度分の降雨は全て浸透し、それを上回る強度分の降雨が凹地損失に充当されるとして取り扱う。

また、必要であれば、単位排水区内の平均有効降雨は、3 種の流出面の有効降雨をそれら流出面の占有面積率を重みとして加重平均して求めることができる。

(3) 雨水流出モデル

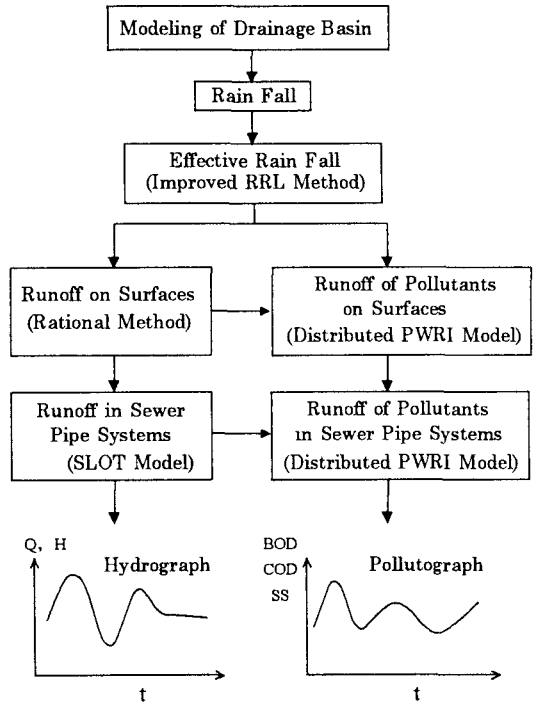


Fig. 1 Flowchart of routing in proposed distributed runoff model.

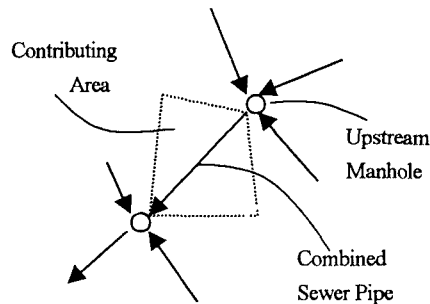


Fig. 2 Unit drainage area.

a) 地表面流出

上述した 3 種の流出面上の雨水（有効降雨）が上流マンホールに到達する時間（雨水伝播時間あるいは雨水流入時間）が、時間的・空間的に一定（一様）である（具体的には、5 分である）とし、合理法⁹⁾により、マンホールへの流入ハイドログラフを算定する。

b) 管渠流出

下水道管渠システムにおける雨水流出では、せき上げ・低下背水流れや圧力流れ、さらには、地表面はらんなどがしばしば現れる。こうした雨水流出の追跡では、流れを、基本的に、ダイナミック・ウェーブとして取り扱う必要がある。ここでは、著者らが検討を進めているスロット・モデルを採用する。なお、章を改め、本モデルの概要を述べることにする。

(4) 汚濁負荷流出モデル

本モデルについても、章を改め、詳細を述べることにする。

3. 分布型汚濁負荷流出モデル —分布型土研モデル^{7), 9), 10)}

本モデルは、従来の土研モデル(集中型土研モデル)を分布型のモデルへと改良したもので、地表面流出モデルと管渠流出モデルからなる。なお、本モデルで解析の対象とする水質項目は、従来の土研モデルと同様に、BOD, COD, SS の 3 つである。また、汚濁負荷の発生場についても、従来の土研モデルと同様に、COD と SS は地表面上と下水管渠内であるとして、一方、BOD は下水管渠内のみであるとして取り扱う。

(1) 汚濁負荷流出の基礎式

a) 地表面上での汚濁負荷流出

分布型土研モデルでは、集中型土研モデルにおいて、流域の地表面全体を対象に一括して適用されていた汚濁負荷の流出の式と連続の式を採用し、これら基礎式を各单位排水区の各流出面に適用する。

これより、汚濁の流出の式および連続の式は、それぞれ、次式のように表される。

COD

$$L_{WC} = (1/3.6)C_{WC}P'_{WC}(r_e - r_{ec})A_W \quad (1)$$

$$dP_{WC}/dt = D_{WC} - L_{WC} \quad ; \quad D_{WC} = D'_{WC}A_W, \quad P_{WC} = 1000 \times P'_{WC}A_W \quad (2)$$

SS

$$L_{WS} = (1/3.6)C_{WS}P'_{WS}(r_e - r_{ec})A_W \quad (3)$$

$$dP_{WS}/dt = D_{WS} - L_{WS} \quad ; \quad D_{WS} = D'_{WS}A_W, \quad P_{WS} = 1000 \times P'_{WS}A_W \quad (4)$$

ここに、 L_{WC} , L_{WS} : 発生負荷量 (gr/s), C_{WC} , C_{WS} : 負荷流出係数 (1/mm), P_{WC} , P_{WS} : 滞積 (残存) 負荷量 (gr), P'_{WC} , P'_{WS} : 単位面積当たりの滞積負荷量 (kg/ha), D_{WC} , D_{WS} : 補給負荷量 (gr/s), D'_{WC} , D'_{WS} : 単位面積当たりの補給負荷量 (kg/ha), A_W : 降雨による負荷発生に関与する流出面の面積 (ha), 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)。また、第 1 下添字 W は流出面上 (雨天時) に関する諸量であること、第 2 下添字 C および S はそれぞれ COD および SS に関する諸量であることを示す。

b) 管渠内での汚濁負荷流出

分布型土研モデルでは、集中型土研モデルにおいて、流域の下水道管渠システム全体を対象に一括して適用されていた汚濁負荷の流出の式および連続の式を採用し、これら基礎式を各单位排水区の各下水管渠 (Fig. 2) に適用する。

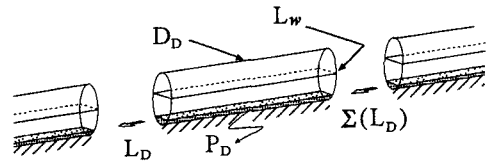


Fig. 3 Routing of pollutants in combined sewer pipe.

すなわち、Fig. 3 に示すように、対象としている下水管渠の上流マンホール地点には、上流に位置する下水管渠からの流出汚濁負荷、直接集水域の流出面からの流出汚濁負荷、および補給汚濁負荷が流入することとなる。

これより、下水管渠内における汚濁負荷の流出の式と連続の式は、それぞれ、次式のように表される。

BOD

$$L_{DB} = C_{DB} P_{DB}^2 (Q - Q_c) \quad (5)$$

$$dP_{DB} / dt = D_{DB} - L_{DB} + \sum (L_{DB}) \quad (6)$$

COD

$$L_{DC} = C_{DC} P_{DC}^2 (Q - Q_c) \quad (7)$$

$$dP_{DC} / dt = D_{DC} - L_{DC} + L_{WC} + \sum (L_{DC}) \quad (8)$$

SS

$$L_{DS} = C_{DS} P_{DS} Q (Q - Q_c) \quad (9)$$

$$dP_{DS} / dt = D_{DS} - L_{DS} + L_{WS} + \sum (L_{DS}) \quad (10)$$

ここに、 L_{DB} 、 L_{DC} 、 L_{DS} ：発生負荷量 (gr/s)、 C_{DB} 、 C_{DC} 、 C_{DS} ：負荷流出係数 ($1/\text{gr}/\text{m}^3$ 、 $1/\text{gr}/\text{m}^3$ 、 s/m^6)、 P_{DB} 、 P_{DC} 、 P_{DS} ：滞積負荷量 (gr)、 D_{DB} 、 D_{DC} 、 D_{DS} ：補給負荷量 (gr/s)、 $\sum (L_{DB})$ 、 $\sum (L_{DC})$ 、 $\sum (L_{DS})$ ：上流の下水管渠よりの流入汚濁負荷量の合計、 Q ：スロット・モデルによる計算流量、 Q_c ：限界流量 (m^3/s)。また、第 1 下添字 D は下水管渠内 (晴天時) に関する諸量であること、第 2 下添字 B は BOD に関する諸量であることを示す。

なお、スロット・モデルによる計算流量 $Q(t)$ の計算時間間隔は、通常、分布型土研モデルにおける雨水および汚濁負荷の流出計算の時間間隔 Δt に比べ、かなり小さくなる。そこで、必要ならば、スロット・モデルによる計算流量として、次の Δt 間の平均流量 $\bar{Q}(t)$ を用いることもできる。

$$\bar{Q}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} Q(t) dt \quad (11)$$

(2) モデル・パラメータの算定法

a) 晴天時 (下水管渠内) パラメータ

各下水管渠に対する負荷流出係数 C_{DB} 、 C_{DC} 、 C_{DS} および初期滞積負荷量 $P_{DB,0}$ 、 $P_{DC,0}$ 、 $P_{DS,0}$ の算定法を以下に示す。ここで、算定法の基本は、集中型土研モデルのそれとほぼ同様であるが、分布型土研モデルでは、本算定法が単位排水区の各下水管渠に適用される。

C_{DB} および $P_{DB,0}$

① 下水道管渠システム全体における初期滞積負荷量は、集中型土研モデルと同様に、1 日補給負荷量の 1/2 に等しいとする。

② 上の管渠システム全体における初期滞積負荷量の各下水管渠への配分については、各下水管渠における初期滞積負荷量 $P_{DB,0}$ が、各単位排水区 (各下水管渠) の直接集水域面積に比例すると仮定する。

③ 各下水管渠の C_{DB} の近似値 C'_{DB} を、次式

$$(\text{雨天時のピーク BOD 濃度}) = C'_{DB} \times P_{DB,0}^2 \quad (12)$$

より推算する。

④ 上の C'_{DB} と $P_{DB,0}$ を用い、晴天時の汚濁負荷流出シミュレーションを行う。ここで、滞積負荷量 $P_{DB}(t)$ のハイドログラフ (1 日間) が収束するまで、同一の晴天時流量ハイドログラフ (1 日間) および補給負荷量 $D_{DB}(t)$ のハイドログラフ (1 日間) を繰り返しインプットして流出シミュレーションを継続

する。

⑤ 収束した $P_{DB}(t)$ ハイドログラフより得られる日平均滞積負荷量を P^*_{DB} とする。

⑥ 求める適値 C_{DB} を、次式より算定する。

$$C'_{DB} \times P^*_{DB}{}^2 = C_{DB} \times P_{DB,0}{}^2 \quad (13)$$

C_{DC} および $P_{DC,0}$

算定法の考え方・手順は、上記の BOD の場合と同様で、第 2 下添字 B を C に置き換えたものとなる。

C_{DS} および $P_{DS,0}$

① 下水道管渠システム全体における初期滞積負荷量は、集中型土研モデルと同様に、1 日補給負荷量の 1/2 に等しいとする。

② 上の管渠システム全体における初期滞積負荷量の各下水管渠への配分については、各下水管渠における初期滞積負荷量 $P_{DS,0}$ が、各単位排水区（各下水管渠）の直接集水域面積に比例すると仮定する。

③ 各下水管渠の C_{DS} の近似値 C'_{DS} を、次式

$$(\text{晴天時の日平均 SS 濃度}) = C'_{DS} \times P_{DS,0} \times \{\text{日平均}(Q - Q_c)\} \quad (14)$$

より推算する。

④ 上の C'_{DS} と $P_{DS,0}$ を用い、晴天時の汚濁負荷流出シミュレーションを行う。ここで、滞積負荷量 $P_{DS}(t)$ のハイドログラフ（1 日間）が収束するまで、同一の晴天時流量ハイドログラフおよび補給負荷量 $D_{DS}(t)$ のハイドログラフ（1 日間）を繰り返しインプットして流出シミュレーションを継続する。

⑤ 収束した $P_{DS}(t)$ ハイドログラフより得られる日平均滞積負荷量を P^*_{DS} とする。

⑥ 求める適値 C_{DS} を、次式より算定する。

$$C'_{DS} \times P^*_{DS} = C_{DS} \times P_{DS,0} \quad (15)$$

b) 雨天時(流出面上)パラメータ

雨天時（流出面上）のパラメータ、すなわち、負荷流出係数 C_{DC} 、 C_{DS} および初期滞積負荷量 $P_{DC,0}$ 、 $P_{DS,0}$ の適値の算定について、ここでは、Table 1 の従来の研究成果¹¹⁾ を利用することとする。

Table 1 Representative values of pollutant runoff parameters

Pollutants Land Use	BOD		COD		SS	
	$P_{WB,0}$ (kg/ha)	C_{WB} (1/mm)	$P_{WC,0}$ (kg/ha)	C_{WC} (1/mm)	$P_{WS,0}$ (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
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

4. 管渠流出モデル —スロット・モデル—^{5), 6)}

4.1 開水路流れの基礎式

下水管渠（上・下流マンホール間の管渠区間）における開水路流れの基礎式は、分布横流入がないものとする、次式のように表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad ; \quad c = \sqrt{\frac{gA}{B}} \quad (17)$$

ここに、 h :水深、 V :断面平均流速、 c :微小擾乱の伝播速度、 A :流水断面積、 B :水面幅、 R :径深、 S_0 :管渠勾配、 n :マンニングの粗度係数、 g :重力加速度、 x :距離、 t :時間。

また、マンホール地点における流れの基礎式は、流出水の流入出に伴うエネルギー・ロスが下水管渠の摩擦損失に含めて取り扱い得るとすると、次式のように表される。

$$F_M \frac{dh_M}{dt} = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} \quad (18)$$

ここに、 h_M :マンホールにおける水深、 F_M :マンホールの水平面積、 ΣQ_{in} :マンホールへの流入流量の合計、 ΣQ_{out} :マンホールからの流出流量の合計。

4.2 圧力流れの基礎式

(1) ラテラル・モデル

合流式下水道管渠システムには、Fig. 4 に示すように、雨水および汚水を下水管渠へ導くための取付管（直径 15～20 cm）が数多く接続されている。雨水は非圧縮、下水管渠は剛であるとし、取付管における流出雨水の貯留を考慮すると、下水管渠における圧力流れの基礎式は、次式のように表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

$$; c' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta) \frac{A_p}{A_t}} \quad (21)$$

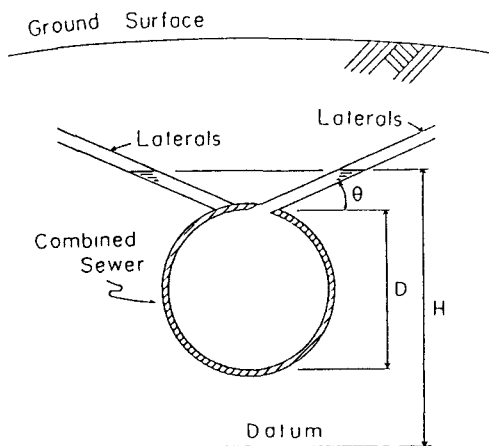


Fig. 4 Lateral pipes and combined sewer pipe.

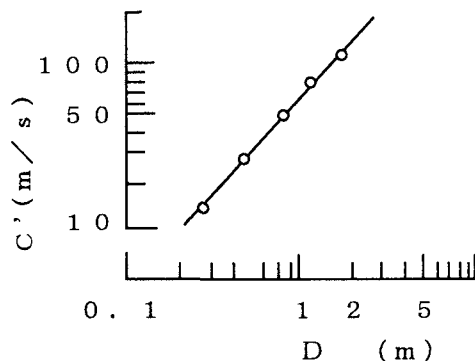


Fig. 5 Relation between c' and D in Matsuyama.

ここに、 h ：管渠底から測った圧力水頭、 c' ：微小擾乱の伝播速度（圧力波伝播速度）、 L および A_p ：下水管渠の長さおよび断面積、 N 、 θ および A_ℓ ：取付管の本数（ L 当たり）、接続角度および断面積。

式 (21) は、下水管渠における圧力波伝播速度が取付管と下水管渠の諸量によって決定されることを示しているが、松山市の公共下水道流域においておよそ 1500 本の下水管渠を任意に抽出してそれらの c' 値 (式 (21)) を調査した結果によれば、Fig. 5 に示すように、 c' は直径 (D) 0.25～2.0 m の下水管渠に対しておよそ 10～100 m/s の値をとることが分かった。

なお、マンホール地点における流れの基礎式は、開水路流れの場合の式 (18) と同一である。

(2) スロット・モデル

圧力流れ（ラテラル・モデル）の基礎式と開水路流れのそれとは、式形が異なっている。下水道管渠システムにおける雨水流出の解析において、両基礎式の式形が異なっていることは、特に、開水路流れと圧力流れの間の流れの遷移を伴う区間での数値解析を非常に複雑かつ不安定なものにしている。

そこで、圧力流れに対し、Fig. 6 に示すように、下水管渠頂部に微小幅のスロットがあると仮定する。これにより、圧力流れは、見かけ上、開水路流れとして取り扱え、したがって、下水管渠の流れの基礎式は、全体として、開水路流れの基礎式のみにより表されることとなる。

なお、スロット幅 B_s は、スロット・モデルがラテラル・モデルと等価である条件、すなわち、両モデルにおける圧力波伝播速度が等しくなる条件を設定することにより、次式のように求められる。

$$B_s = gA_p / c'^2 \quad (22)$$

4.3 遷移部の数値解析法¹²⁾

上述した流れの基礎式の数値解析法に、ここでは、特性曲線法を用いる。下水道管渠システムにおける雨水流出の数値解析で最も関心のあるところは、流れの遷移（開水路流れ ⇄ 圧力流れ）部での数値解析手法である。

開水路流れの伝播速度は数 m/s であるが、圧力流れのそれは数10～数100 m/s と 1～2 オーダも大きい。このため、流れの遷移部では、特性曲線の曲がりが大きく、また、特性曲線に沿っての水理量の時空間的変化也非常に大きい。このため、水理量が時空間的に線形変化していると仮定する通常の数値解析手法を用いると、計算が不安定に陥り易く、発散することもしばしばである。

ここでは、Fig. 7 に示すように、流れの遷移部を含む計算区間 (Δx) においてのみ、計算時間間隔 Δt を 30 程度に等分割し、特性曲線式と特性方程式の時空間的な変動を忠実に追跡（逐次積分）する手法を用いる。

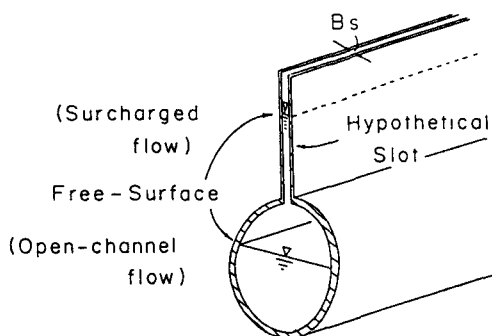


Fig. 6 Combined sewer pipe with hypothetical slot.

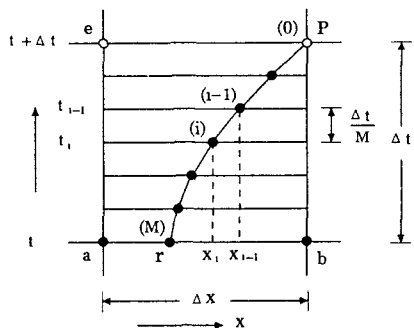


Fig. 7 Successive integration of characteristics.

5. 実流域への適用

上述した分布型流出解析モデルを、低平な市街地の合流式ポンプ排水区に適用し、降雨時の流量と水質の流出シミュレーション結果を実測結果と対比して、本解析法の実流域への適用性について検討した。

5.1 解析対象流域の概要

検討の対象とした合流式ポンプ排水区の概要を、Fig. 8 に示す。本排水区は、面積が 455 ha、不浸透域が排水区の 85 % を占める典型的な市街地域（商業地域）である。

下水道管渠システムは、直径が 300~1 800 mm、総延長がおよそ 10 km の下水管渠からなり、こう配は 4 ‰（平均）と全体に緩やかである。また、低平地であることに加え、下流端のポンプ場での吐出ポンプが間欠的に運転されているため、降雨時には、下水道管渠システム内で、せき上げ背水や低下背水現象が生じていると考えられ、さらに、強雨時には、圧力流れ（満管流）などを伴うサーチャージ現象も生じていると考えられる。

なお、ポンプ場から北西 → 北東 → 東へと展開しているおよそ 2 km の幹線管渠システムの縦断面図を、Fig. 9 に示す。

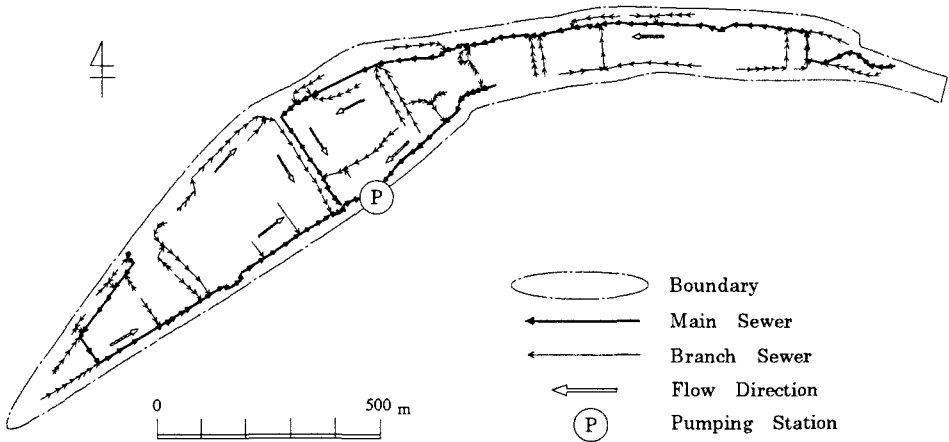


Fig. 8 Combined sewer pipe system of research basin

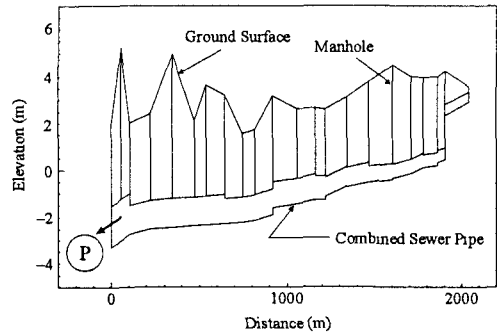


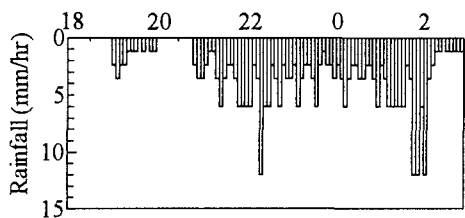
Fig. 9 Longitudinal profile of a main sewer pipe system.

5.2 流出シミュレーション結果

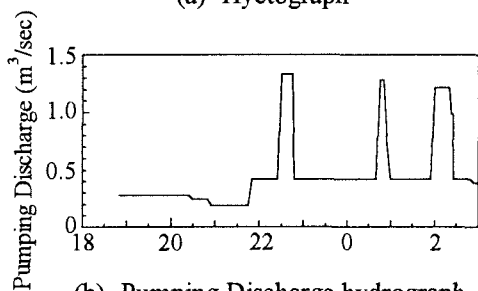
(1) 従来の流出解析モデルによるシミュレーション結果⁷⁾

従来の汚濁負荷流出解析法、すなわち、雨水流出解析には修正 RRL 法、汚濁負荷流出解析には集中型土研モデルを用いる解析法を、上述の実排水区に適用し、排水区下流端のポンプ場流入地点における雨天時汚濁負荷（BOD、COD、SS）流出シミュレーション結果を実測結果と対比して、従来の流出解析法の適用性を検討した。一例を、Fig. 10 および Fig. 11 に示す。

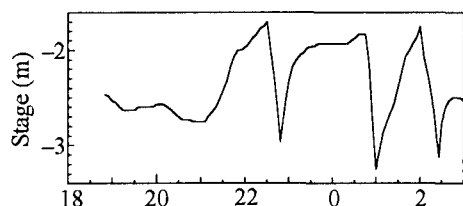
これらより、従来の流出解析法による流出シ



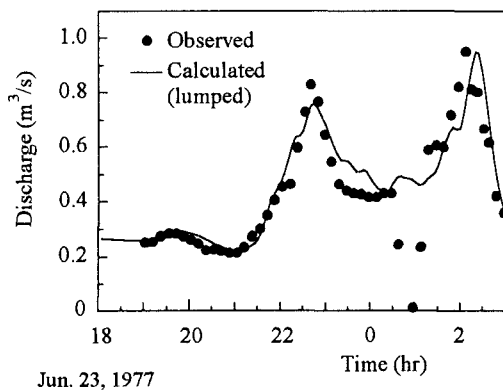
(a) Hyetograph



(b) Pumping Discharge hydrograph



(c) Stage hydrograph at Pumping Station



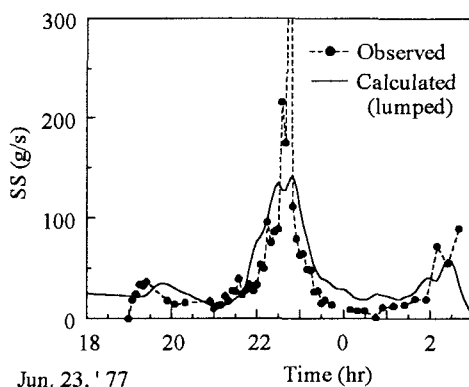
Jun. 23, 1977

(d) Comparison of simulated and observed discharge hydrographs (lumped model).

Fig. 10 Observed and simulated runoff hydrographs.

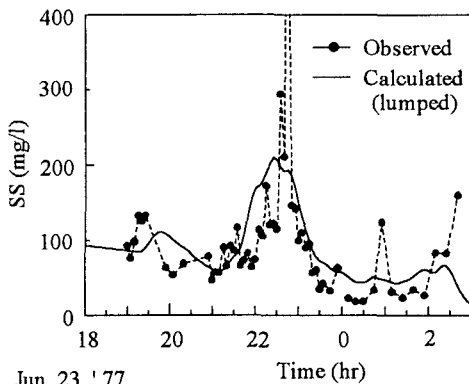
ミュレーション結果 (lumped) は、雨水および汚濁負荷のいずれの流出においても、実用上からは、十分な適合度を示していると言える。しかし、詳細にみると、排水区下流端ポンプの間欠運転に伴って発生するせき上げ背水流れや低下背水流れに起因すると考えられる雨水と汚濁負荷の抑制されたあるいは加速された流出性状 (22 時 30 分前後および 1 時前後) については、それらを必ずしも十分には再現し得てないことが分かる。

すなわち、従来の流出解析法は、本来、キネマティック・ウェーブ流れを対象とするものである、ダイナミック・ウェーブ流れとしての取扱いが必要となる流れの制御を伴う下水道管渠シ



Jun. 23, '77

(a) SS - Loadographs



Jun. 23, '77

(b) SS - Pollutographs

Fig. 11 Comparison of simulated and observed runoff hydrographs (lumped model).

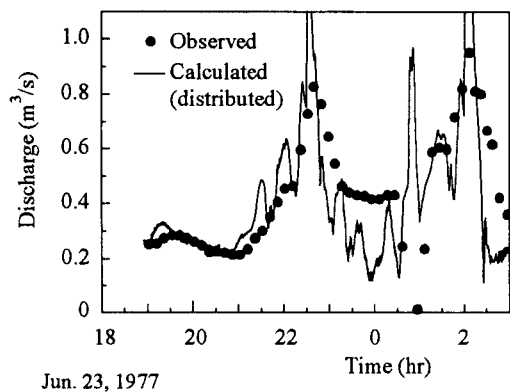


Fig. 12 Comparison of simulated and observed discharge hydrographs (distributed model).

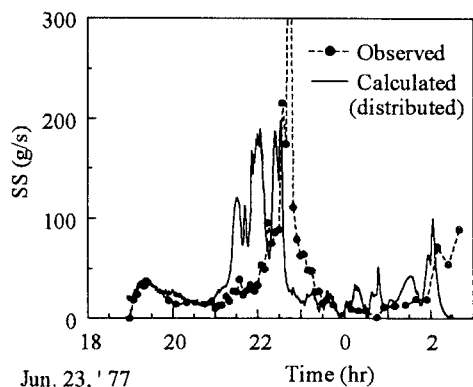
テムにおける越流水対策にそれを適用することには、自ずと、限界があると考えられる。

(2) 分布型流出解析モデルによるシミュレーション結果

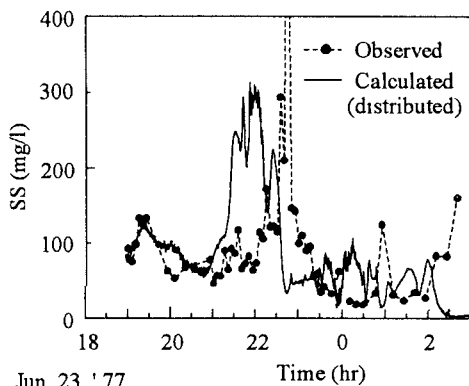
前述した分布型流出解析モデルを先のポンプ排水区に適用し、本モデルによる雨水と汚濁負荷の流出シミュレーション結果 (distributed) を、実測結果 (observed) および従来の流出解析モデルによる流出シミュレーション結果 (lumped) と対比して、本モデルの実流域への適用性について検討した。一例を、Fig. 12~14 および Table 2~4 に示す。

これらより、ここに提案した分布型流出解析モデルによる流出シミュレーション結果の適合度は、実測結果に比べて全体的に流出が早く現れるなど、現段階では、雨水および汚濁負荷のいずれの流出についても、必ずしも十分なものであるとは言えない。しかしながら、先に指摘した、ポンプの間欠的な運転操作に伴って発生する雨水と汚濁負荷の抑制的なあるいは加速的な流出性状 (23 時 30 分前後および 1 時前後) については、本分布型流出解析モデルによって、それらをよく再現する結果の得られてきていることが分かる。

次に、分布型土研モデルにおいて算定された管渠内 (晴天時) の負荷流出係数 C の値を見ると (Table 4), BOD, COD, SS のいずれについても、集水面積の大きい単位排水区と小さいそれとの比が 10^2 程度であることに対応して、大きいものと小さいものと



(a) SS - Loadographs



(b) SS - Pollutographs

Fig. 13 Comparison of simulated and observed runoff hydrographs (distributed model).

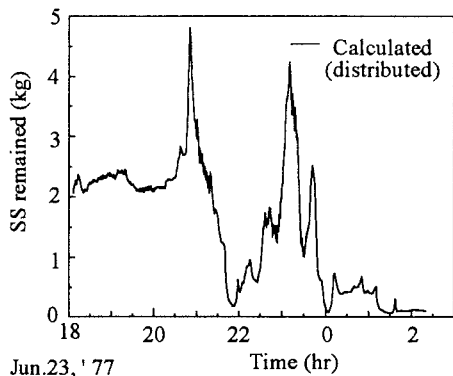


Fig. 14 Hydrograph of SS remained in the sewer pipe at the downstream end of the pipe system (distributed model).

Table 2 Evaluated values of runoff parameters of pollutants in surfaces

BOD		COD		SS	
$P_{WB,0}$ (kg/ha)	C_{WB} (1/mm)	$P_{WC,0}$ (kg/ha)	C_{WC} (1/mm)	$P_{WS,0}$ (kg/ha)	C_{WS} (1/mm)
—	—	2.00	0.30	10.0	0.10

Table 3 Evaluated values of runoff parameters of pollutants in sewer pipes (lumped model)

BOD		COD		SS	
$P_{DB,0}$ (kg/ha)	C_{DB} (1/gr/m ³)	$P_{DC,0}$ (kg/ha)	C_{DC} (1/gr/m ³)	$P_{DS,0}$ (kg/ha)	C_{DS} (s/m ⁶)
10.8	4.81×10^{-10}	6.32	8.21×10^{-10}	13.8	1.13×10^{-3}

Table 4 Evaluated values of runoff parameters of pollutants in sewer pipes (distributed model)

BOD		COD		SS	
$P_{DB,0}$ (kg/ha)	C_{DB} (1/gr/m ³)	$P_{DC,0}$ (kg/ha)	C_{DC} (1/gr/m ³)	$P_{DS,0}$ (kg/ha)	C_{DS} (s/m ⁶)
10.8	5.0×10^{-7} $\sim 3.0 \times 10^{-5}$	6.32	1.0×10^{-6} $\sim 6.0 \times 10^{-5}$	13.8	1.0×10^{-1} $\sim 5.0 \times 10^1$

で 2 オーダー程度異なってきたことが分かる（補遺 1）。

さらに、上述の負荷流出係数 C の値（Table 4）を、集中型土研モデルにおいて算定されている値（Table 3）と比べると、分布型土研モデルにおいて排水区が 100 個足らずの単位排水区（下水道管渠システムが 100 個足らずの下水管渠）で構成されていることに対応して、BOD, COD, SS のいずれについても、4 オーダー程度大きい値が求められてきていることが分かる（補遺 1）。

6. 結 論

本論文では、汚濁負荷流出に分布型土研モデル、雨水流出にスロット・モデルを用いる分布型の雨水・汚濁負荷流出解析モデルを提示し、これを実流域に適用してその有用性について検討した。

本研究で得られた知見を要約すると、以下のようである。

① ここに提案した分布型流出解析モデルによれば、現段階では、再現性は全体に必ずしも十分であるとは言いがたいが、下水道管渠システム内で発生する抑制的なあるいは加速的な雨水と汚濁負荷の流出性状については、これらをよく再現する流出シミュレーション結果を得ることができる。

② これより、幾つかの課題は残されているものの、今後、雨水流出制御を伴う下水道管渠システムの各種越流水対策の効果を検討する際の有力なモデルとして、本モデルを採用しえる見通しが得られたと言える。

③ 分布型土研モデルの管渠内（晴天時）における負荷流出係数の適値は、解析対象排水区での $(A/A_p)^2$ の平均値が 10^4 程度であることに応じて、BOD, COD および SS のいずれについても、集中型土研モデルのそれらに比べて 4 オーダー程度大きい値となる。

④ 本分布型流出解析モデルのパラメータの適値の多くは従来の集中型流出解析モデルのそれらを準用できるなど、本モデルでは、既往の数多くの貴重な研究成果を有効に利用できる。

⑤ 集中型および分布型の土研モデルでは、管渠内における汚濁負荷の流出は流量（流速）によって引き起こされるとしている。したがって、せき上げ背水などによって流量が小さく抑えられると汚濁負荷の流出量がゼロに近づき、（濃度）＝（汚濁負荷流出量）／（流量）の関係より、流出雨水の汚濁負荷濃度がゼロ

に近づくなど、土研モデルには、改善すべき幾つかの問題点が残されている。

補遺 1 定常時における流出水の汚濁負荷濃度は、集中型土研モデルにおいても分布型土研モデルの全ての下水管渠においてもほぼ同一の値をとると考えられるので、次式が成立する。

$$\begin{cases} C_{DB} \cdot P_{DB,0}^2 = (C_{DB})_i \cdot (P_{DB,0})_i^2 & \text{for BOD} \\ C_{DS} \cdot P_{DS,0} \cdot Q = (C_{DS})_i \cdot (P_{DS,0})_i \cdot Q_i & \text{for SS} \end{cases}$$

ここに、太字は集中型土研モデルにおける、下添え字 i は分布型土研モデルにおける任意の下水管渠 i における諸量であることを示す。

集中型土研モデルでの初期残存量が分布型土研モデルでの各下水管渠にそれらの集水面積 A_i に比例して配分されているとすると、 $(P_{DB,0})_i = P_{DB,0} \cdot (A_i / A)$ 、 $(P_{DS,0})_i = P_{DS,0} \cdot (A_i / A)$ が成立し (A : 流域面積)、さらに、 $Q_i = Q \cdot (A_i / A)$ と表されることより、次式が得られる。

$$\begin{cases} (C_{DB})_i / C_{DB} = \{P_{DB,0} / (P_{DB,0})_i\}^2 = (A / A_i)^2 \\ (C_{DS})_i / C_{DS} = \{P_{DB,0} / (P_{DB,0})_i\} \cdot (Q / Q_i) = (A / A_i)^2 \end{cases}$$

解析対象排水区では、 $A / A_i \approx 100$ であり、 $(C_{DB})_i / C_{DB} = (C_{DS})_i / C_{DS} \approx 10^4$ となる。なお、COD に関連する議論は、BOD のそれと同様である。

参考文献

- 1) 山口高志, 松原重昭, 山守 隆: 都市における降雨流出調査第 2 報—修正 RRL 法による流出推定—, 土木技術資料, 第 14 巻, 第 11 号, pp.34-39, 1972 年.
- 2) 建設省都市局下水道部監修, (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—, 1982 年.
- 3) 和田安彦, 三浦浩之: 分流式下水道の雨水流出に伴う汚濁負荷流出モデルとその適用, 土木学会論文集, 第 369 号/II-5, pp.287-293, 1986 年.
- 4) 海老瀬潜一: 降雨時流出負荷量算定のための回帰モデル, 土木学会衛生工学研究論文集, Vol. 20, pp. 27-38, 1984 年.
- 5) 渡辺政広, 江藤剛治, 室田 明: 取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, 第 411 号/II-12, pp.81-90, 1989 年.
- 6) Watanabe, M., T. Etoh, and T. Kanda: Stormwater runoff simulation with surcharge in urban sewer pipe systems, Proc. of the Fourth Japan-Chinese (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, pp. 151 - 160, 1997.
- 7) 渡辺政広, 永吉光一, 右近雄大: 土研モデルと SWMM を組み合わせた下水道流域の汚濁負荷流出モデル, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.199-204, 1998 年.
- 8) (社)日本下水道協会: 下水道雨水調整池技術基準(案)—解説と計算例—, pp.8-18, 1984 年.
- 9) 渡辺政広, 藤田和博, 時尾嘉弘: 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, 環境工学研究論文集, 第 31 巻, pp.117-128, 1994 年.
- 10) 渡辺政広: 都市河川の水質環境, 土木学会水理委員会 1997 年度 (第 33 回) 水工学に関する夏期研修会講義集, pp.A-7-1 - A-7-19, 1997 年.
- 11) 虫明功臣, 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 年.
- 12) 渡辺政広, 栗原 崇: 下水道管渠における遷移流れ (開水路流れ⇔圧力流れ) の数値計算法, 水工学論文集, 第 37 巻, pp.523-528, 1993 年.