

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

DISTRIBUTED RUNOFF MODEL OF WATER QUALITY AND STORM WATER
IN URBAN SEWER PIPE SYSTEMS COMBINING PWRI MODEL AND SWMM

渡辺政広¹・永吉光一²・右近雄大³

Masahiro WATANABE, Kouichi NAGAYOSHI and Takehiro UKON

¹ 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790 松山市文京町 3番)
² 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 土木海洋工学専攻 (〒790 松山市文京町 3番)
³ 正会員 工修 中電技術コンサルタント(株) (〒734 広島市南区出汐 2-3-30)

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 that can treat a back water effect.

Simulated pollutographs by the proposed model are compared with simulated ones by PWRI Model as well as observed ones at a pumping station, and the adaptability of the model is investigated.

Key Words : SWMM, PWRI Model, distributed model, unsteady flow simulation, water quality, storm water runoff

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⁾と組み合わせて用いられ, 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, これらモデルを用いて上述の越流水問題を解決するための諸対策を確立するこ

とはできない。

本研究は, こ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, まず, 地表面上の雨水追跡に合理法を, 下水道管渠システムにおける雨水流出水の追跡に SWMM-EXTRAN⁵⁾を, 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, 本モデルの適用性について検討した結果を述べる。

なお, 分布型へと改良した土研モデルを, ここでは, 「分布型土研モデル」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, 図-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。

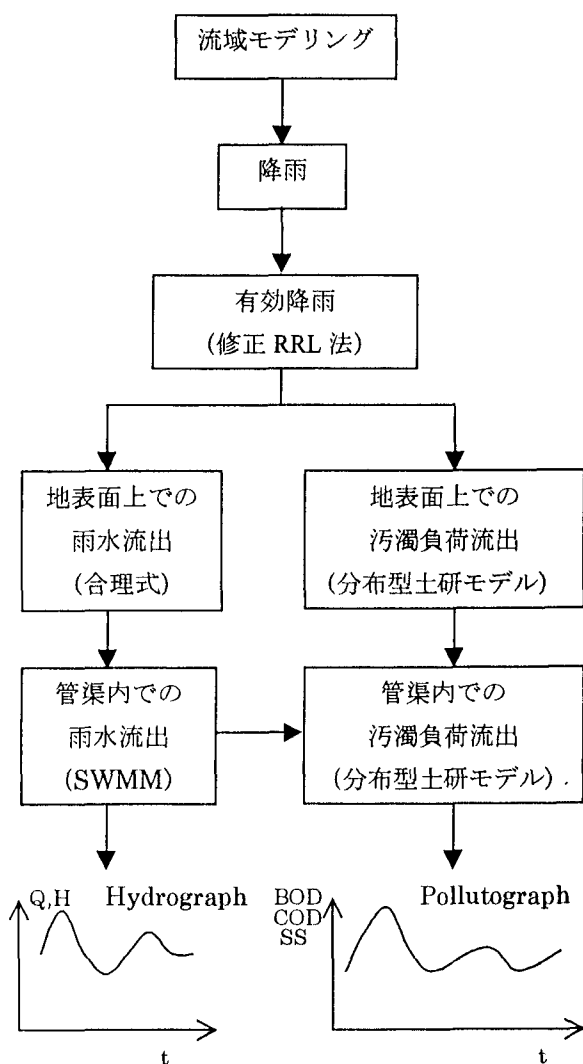


図-1 分布型流出解析モデルの構成

(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、図-2 に示すように、上流マンホール、下水道管渠、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道管渠の諸元（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、雨水損失の無い不浸透性流出面、凹地損失のある不浸透性流出面、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

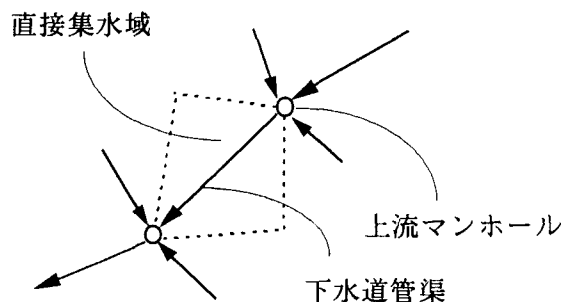


図-2 流域モデリングと単位排水区

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

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⁶⁾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には、バック・ウォータ現象や圧力流れ、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、1980 年代始めに米国で開発され、その後も数回の改良が加えられて、現在でも、米国、カナダ、欧州の各国で広く用いられてきている SWMM (Storm Water Management Model) - EXTRAN⁵⁾を採用する。

なお、本モデルの詳細については、文献 5)を参照されたい。

(4) 汚濁負荷流出モデル

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^{7), 8)}

本モデルは、著者らにより、従来の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は、土研モデルと同様に、COD と SS は地表面上と下水道管渠内であるとして、一方、BOD は下水道管渠内のみであるとして扱う。

(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、従来の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

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

$$dP_{WC}/dt = D_{WC} - L_{WC} \quad (2)$$

$$; D_{WC} = D'_{WC}A_W$$

$$; P_{WC} = 1000 \times P'_{WC}A_W$$

SS

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

$$dP_{WS}/dt = D_{WS} - L_{WS} \quad (4)$$

$$; D_{WS} = D'_{WS}A_W$$

$$; P_{WS} = 1000 \times P'_{WS}A_W$$

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關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) に關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 に關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、従来の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道管渠 (図-2) に適用する。

ここで、図-3 に示すように、対象としている下水道管渠の上流マンホール地点には、上流に位置する下水道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、下水道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

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

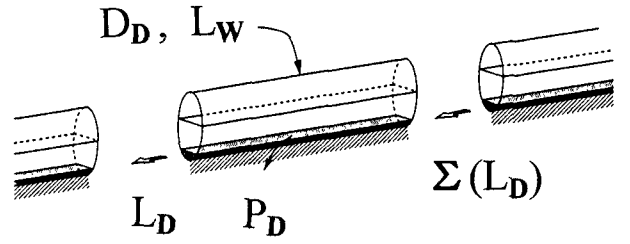


図-3 下水道管渠における汚濁負荷の流入出

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

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/gr/m³，1/gr/m³，s/m⁶)， 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)， $\sum(L_{DB})$ 、 $\sum(L_{DC})$ 、 $\sum(L_{DS})$ ：上流の下水道管渠よりの流入汚濁負荷量の合計， Q ：SWMM による計算流量， Q_c ：限界流量 (m³/s)。また、第 1 下添字 D は下水道管渠内 (晴天時) に關する諸量であること、第 2 下添字 B は BOD に關する諸量であることを示す。

なお、SWMM 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、SWMM 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 (下水道管渠内) パラメータ

各下水道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、従来の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道管渠に適用される。

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、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道管渠への配分については、各下水道

表-1 流出面パラメータの適値

汚濁負荷 土地利用	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)
屋根	0.2	0.25~0.30	0.3	0.25~0.30	2.2	0.50~0.65
住宅地区	3	0.10~0.12	7	0.09~0.13	10	0.13~0.16
商業地区	12	0.10~0.20	16	0.10~0.12	24	0.10~0.20
工業地区	5	0.08~0.10	8	0.07~0.10	10	0.06~0.13

管渠における初期滞積負荷量 $P_{DB,0}$ が、各単位排水区（各下水道管渠）の直接集水域面積に比例すると仮定する。

③各下水道管渠の C_{DB} の近似値 C'_{DB} を、次式（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。

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

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、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道管渠への配分については、各下水道管渠における初期滞積負荷量 $P_{DS,0}$ が、各単位排水区（各下水道管渠）の直接集水域面積に比例すると仮定する。

③各下水道管渠の C_{DS} の近似値 C'_{DS} を、次式（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、表-1 の従来の研究成果⁹⁾を利用することとする。

4. 適用性に関する検討

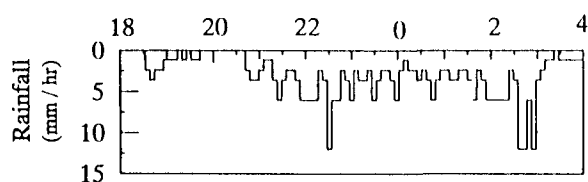
はじめに、従来より広く利用されている修正 RRL 法と土研モデルを組み合わせた流出解析法を、市街地域の低平な 1 合流式ポンプ排水区に適用し、その適用性を検討した（図-4）。

次に、提案している分布型流出解析モデルを、上のポンプ排水区を模擬した排水区（図-5）に適用し、本法（本モデル）の有用性について検討した（図-6、表-2、3、4）。

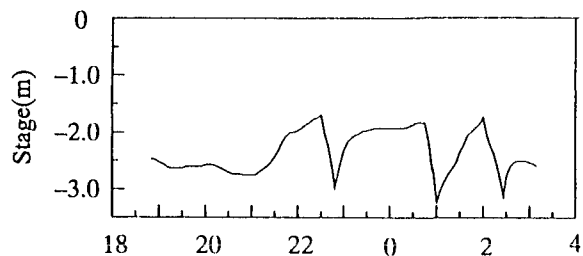
(1) 解析対象排水区の概要

検討の対象とした合流式ポンプ排水区は、面積が 46 ha、不浸透域がその 85 % を占める典型的な市街地域（商業地域）である。

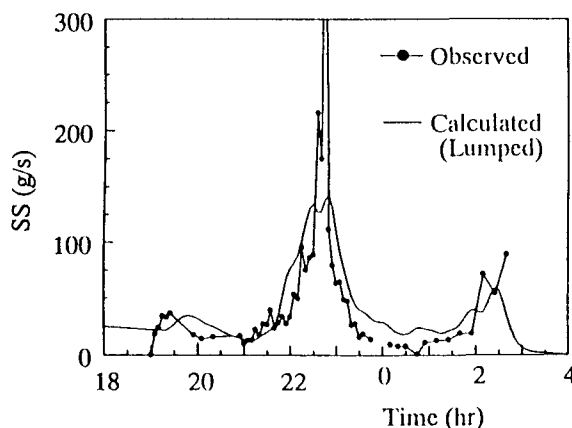
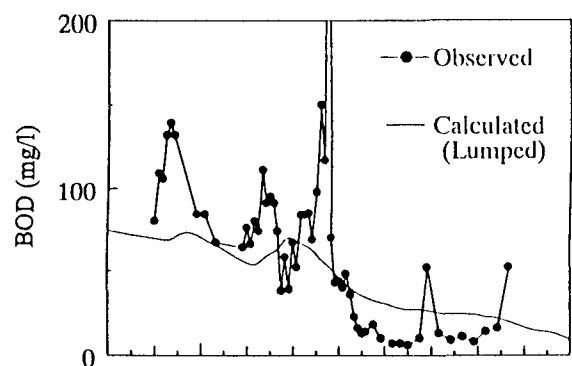
下水道管渠システムは、直径が 250~1 800 mm、総延長 10 km の下水道管渠からなり、こう配は 4 ‰（平均）と全体に緩やかである。また、低平地であることに加え、吐出ポンプが間欠的に運転されるため、降雨時には、管渠システム内で、下流端（ポンプ場）から上流へ向けてせき上げ背水や低下背水現象が生じていると考えられる。さらに、強雨時には、満管流などを伴うサーチャージ現象も生じていると考えられる。



(a) ハイエトグラフ (実測値)



(b) ポンプ井水位ハイドロ (実測値)



Jun. 23, 1977

(c) ポルートグラフ

図-4 実排水区における計算結果と実測値の比較

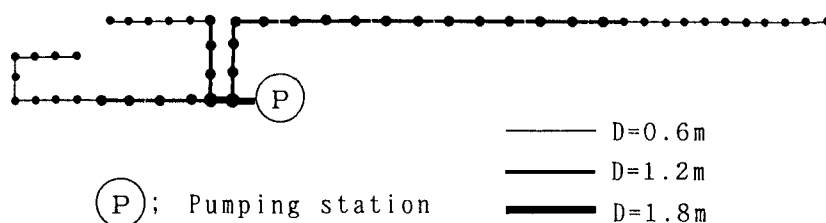


図-5 模擬ポンプ排水区の下水道管渠システム (管渠総数: 49本, 総延長: 3.9 km, 直径: 600-1 800 mm, こう配: 2-4 ‰)

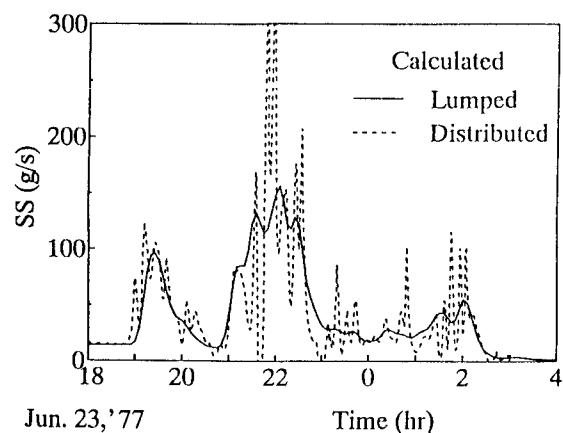
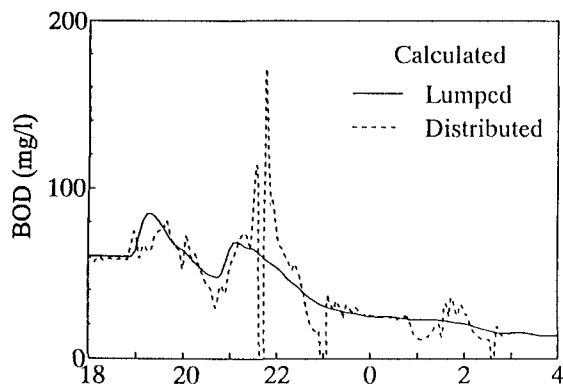


図-6 模擬排水区におけるポルートグラフの比較

(2) 従来の汚濁負荷流出モデル (修正 RRL法+土研モデル) による流出シミュレーション結果

従来の汚濁負荷流出モデルを, 上記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, 従来のモデルの適用性を検討した。一例を図-4 に示す。

これより, ポンプの間欠運転に起因して, せき上げ背水や低下背水流れが発生すると, 汚濁負荷流出はかなり複雑な流出性状を示ようになるが, 従来の修正 RRL 法と土研モデルを組み合わせた流出モデルでは, こうした複雑な流出現象を十分に再現し得てないことが分かる。

すなわち, 流れの制御を伴う下水道管渠システ

表-2 流出シミュレーションに用いた地表面パラメータの適値

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)
—	—	2.0	0.3	10.0	0.1

表-3 算定された下水道管渠内パラメータの適値（従来の土研モデル）

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} (1/mm)
10.8	4.81×10^{-10}	6.32	8.21×10^{-10}	13.8	1.13×10^{-3}

表-4 算定された下水道管渠内パラメータの適値（分布型土研モデル）

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} (1/mm)
10.8	1.11×10^{-6}	6.32	1.89×10^{-6}	13.8	0.06~2.78

ムにおける越流水対策について、これを従来の流出解析モデルを用いて検討することはかなり難しくなってくるであろうことが分かる。

(3) 分布型汚濁負荷流出モデルの適用性

前述した模擬排水区（図-5）に従来の（Lumped）および分布型（Distributed）の汚濁負荷流出モデルを適用し、それらシミュレーション結果を比較（図-6）すると共に、図-4(c)の実測結果とも対比して、分布型汚濁負荷流出モデルの有用性を検討した。

ここで、降雨条件には実測ハイエト（図-4(a)）を、下流端条件にはポンプ場での水位ハイドロ（図-4(b)）を与え、計算時間間隔は、従来のモデルで5分を、分布型で10秒を採用した。

得られた知見の幾つかを、以下に挙げる。

① 管渠内初期滞積負荷量の適値(表-3, 4)は、両モデルで同一の値をとる。

② BOD および COD の負荷流出係数の分布型モデルの適値(表-3, 4)は、従来のモデルのそれに比べて4オーダー程度小さい値をとる。

③ SS の負荷流出係数の分布型モデルの適値(表-4)は、下水道管渠の晴天時流量に依存しており、上流に位置する管渠での0.06から、最下流の管渠の2.8まで変化している。

④ 分布型モデルによるポルトグラフ（図-6）では、実排水区の実測結果（図-4(c)）に見られるような従来のモデルではシミュレートし得なかった複雑な流出性状がかなりよく再現されている。

5. 結論

本論文では、土研モデルとSWMMを組み合

わせた雨水と汚濁負荷の流出解析モデルを提示し、その適用性について検討した。

その結果、今後、雨水流出制御を伴う下水道管渠システムの越流水対策を検討する際の有力なモデルとして、本モデルを用いてよいであろう見通しが得られた。

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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 5) Roesner, L. A., J. A. Aldrich and R. E. Dickinson: Storm Water Management Model; Ver.4--Part B; EXTRAN Addendum, U. S. EPA/600/3-88/001b, 1988.
- 6) (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.
- 7) 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, 環境工学研究論文集, 第31巻, pp.117-128, 1994.
- 8) 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.
- 9) 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.

(1997. 9. 30受付)