

雨天時汚濁負荷量流出モデル 比較検討調査

1. 調査の背景と目的

公共用水域の水質保全是下水道の重要な役割のひとつであるが、都市域においては合流式下水道が主要な排除方式となっており、多くの地域で、雨天時に公共水域へ流出する汚濁負荷の定量的な把握が必要とされている。

また、浸水対策や合流改善用に大口径雨水貯留管が築造されるなど、下水管網構造も複雑化する傾向にあり、これらの貯留量・流出量を正確にシミュレーションし、その結果を定量的に把握する手法の確立が望まれている。

我が国における雨水の流出解析手法としては、従来より、合理式、単位図法、貯留関数法、タンクモデル、等価粗度法、準線形貯留モデル、修正RRL法、メッシュ法などがある。これらの手法の中で、流量計算は、修正RRL法あるいは合理式法、汚濁負荷量計算には土木研究所モデルが多く利用されている。

一方、近年のコンピュータ技術の進展にあいまって、海外では新しい流出解析モデルや汚濁負荷量解析モデルが実用化されている。しかし、日本ではこれらのモデルが知られておらず、的確な運用にまで至っていない状況である。

これらの状況から、昨年度の調査から選定した3種類のモデルについて基本式、特性を把握するとともに、日本における実流域での解析を行い、各モデルの有用性、ユーザーインターフェイスの違いなど

を把握することを目的として本調査を実施した。

- ① 海外で使用されているソフトウェアの特徴・適用条件などの把握
- ② 評価すべきモデルの選定
- ③ モデルの構成等の整理
- ④ モデルの試運転
- ⑤ 実領域でのシミュレーション(1)
- ⑥ パラメータに関する調査
- ⑦ 実領域でのシミュレーション(2)
- ⑧ 日本の流域への適用性の検討

本調査は平成6年度～8年度の3ヶ年計画で実施するものであり、7年度は上記のうち、主に③、④、⑤について実施した。

なお、本調査は本機構が建設省土木研究所より受託し実施したものである。

2. 調査対象モデル

昨年度の調査から本年度の調査対象としたモデルの概要を以下に示す。

① HydroWorks

HydroWorksは1975年に英国の水理研究局とウォーリングフォード水理研究所により開発されたシミュレーションモデル「WASSP」、その後の「WALLRUS」、「SPIDA」の流れをくむシミュレーションソフトである。1994年に発売になっている。Windows環境のもとで動作する、対話型のシミュレーションシステムである。

表-1 流出モデルのまとめ

	Hydro Works	MOUSE	XP-SWMM
降雨モデル	直接降雨強度	データベース	データベース
地表面流出モデル	二重線形貯留タンクモデル $S = k q$	TIME/AREA法 $n = \frac{I_c}{\Delta t}$ 非線形貯留池法 1)有効雨量 $R_{eff} = R - Q_E - Q_W - Q_I - Q_S$ 2)流出モデルに対する連続式 $R_{eff} \cdot A - Q = dy/dt \cdot A$ 3)表面流出モデル $Q = M \cdot B \cdot I^{1/2} y^{5/3}$	非線形貯留池法 合理式
水理モデル	サンヴナン式 $\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$ $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right]}{\partial X} + g A \frac{\partial y}{\partial X} = g A (I_0 - I_1)$	(1)サンヴナン式 (2)運動波モデル $Q = M \cdot A \cdot R^{2/3} I_0^{1/2}$ (3)拡散波モデル $g A \frac{\partial y}{\partial X} + g A I_1 = g A I_0$	(1)サンヴナン式 (2)キネマティック・ウェーブ式 $\partial Q / \partial t + C_s \cdot \partial Q / \partial x = 0$ (3)非線形貯留池法 $m K Q^{m-1} (dQ/dt) + Q - i_n = 0$

② MOUSE

MOUSEは、1980年代にLyngbyにあるデンマーク大学環境工学研究所が水文学的分野をデンマーク水理研究所が水理学的分野を担当し、両者の協力により開発されたものである。MOUSEは、様々なタスクやプロセスごとに論理ユニット・モジュールで構成されている。また、すべてのモジュールは、MOUSEメニューに組み込まれており、ユーザーの目的に応じ、自動的にモジュールを選択するシステムである。

③ XP-SWMM

XP-SWMMは、1969年頃にアメリカEPA、フロリダ大学、WATER RESOURCES ENGINEERINGを中心として開発された雨水管理モデルである「SWMM」をベースとして、XPソフトウェア社が使いやすいグラフィック環境を実現させたソフトである。XP-SWMMは、様々な解析に対して、いくつかのブロックに分かれており、目的に応じてブロック選択を行い、処理を実行することが可能である。

2.1 流出モデル

3つのモデルの流出モデルにおける降雨、地表面流出、水理の各内容について整理した(表-1)。

降雨モデルにおいては、降雨記録に基づきデータベース化された既往降雨データと、降雨強度式から作成される設計降雨データが用いられる。いずれの

場合でも、時系列データであることが必要である。

地表面流出モデルとしてHydroWorksは、二重線形貯留タンクモデルの一種類だがMOUSEにおいては時間/面積法、非線形貯留法がXP-SWMMにおいては非線形貯留法、合理式各々二種類が用意されている。

水理モデルには、各モデルとも連続式と非定常流の運動方程式からなるサンヴナン式モデルが使用されている。

2.2 汚濁負荷量モデル

汚濁負荷量モデルは、「地表面における汚濁物質の堆積と流出に関するモデル」、「雨水桝における汚濁物質の堆積と流出」と「管渠における汚濁物質の挙動に関するモデル」に分けられ、それらを整理した。(表-2)

地表面における汚濁物質の堆積量は、降雨に先立つ晴天日継続日数と土地利用形態を係数とした指数関数が使用されている。

地表面からの汚濁物質の流出量は、MOUSEとHydroWorksにおいては、降雨強度を係数とした雨滴による浸食及び地表流による沈殿物の掃流を考慮している。

管渠における沈殿物輸送モデルにおいては、MOUSEが4つの異なる沈殿物輸送式を用いて非粘着性沈殿物の輸送計算を行うことができる。単純なモデルは管渠内の沈殿堆積物による流水抵

		Hydro Works	MOUSE	XP-SWMM
地表面	堆積	指数堆積関数 $dM/dt = P_s - K \cdot M$	直線的堆積関数 $dM/dt = A_c (M < M_{max})$ $dM/dt = 0 (M > M_{max})$ 指数的堆積関数 $dM/dt = A_c - D \cdot M$	・堆積を考慮しない ・土地用途別に設定 ・時間と汚濁物質の累積量の関数式 べき乗式 $CQ = A \cdot X \cdot t^B$ 指数式 $CQ = Limit \cdot X \cdot (1 - e^{-c \cdot t})$ Michaelis-Menten式 $CQ = Limit \cdot X \cdot t / (D + t)$
	流出	Desbordes流出モデル	降雨による掃流 雨滴による浸食 $V = D(i_r/i_d)^2 \cdot L \cdot W \cdot (1 - \epsilon) \cdot A$ 地表流による沈殿物の掃流 $q = q_b + q_s$	・降雨中間濃度法 ・指数関数法 $CumWashoff = PSHE DO \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$ ・定格曲線 $Washoff = C \cdot R^D$
雨水樹		単純混合モデル 溶解性のみ考慮	単純混合モデル 溶解性のみ考慮	単純混合モデル
管内	堆積物移送	一次元輸送モデル $dc/dt + u \cdot dc/dx = 0$ Ackers-White理論	Ackers-Whiteの式 Engelund-Hansenの式 Enkelund-Fredsoe-Deigaardの式 Van Rijnの式	Shieldsの式 $\frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g D_c} = f \left(\frac{u^* D}{V} \right)$
	移流分散		移流-分散方程式 $\frac{\partial(A \cdot C)}{\partial t} - \frac{\partial(Q \cdot C)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -A \cdot K \cdot C + C \cdot q_s$ 溶解性物質に対応	
	化学生物反応		BODの変化に対応(再曝気、溶解性、浮遊性等) 細菌(大腸菌等)の減衰	

図-2 水質モデルのまとめ

抗だけで計算する。複雑なモデルは、粒径別に等級された沈殿物に対して完全なる形態学的モデルとしている。どのモデルを適用するかは、適切なデータ等のファクターから判断する必要がある。

また、MOUSEは、質量保存則、フィックの拡散法則から導いた移流-拡散式により下水管網における溶解性物質の輸送計算と水温変化のモデル化が考慮できる。更に、下水管網内で見られる細菌の生存や酸素条件を包括した化学的、生物学的な相互作用をモデル化している。

3. 簡単なモデルを対象としたシミュレーション

雨水流出解析モデルに求められる仕様、機能は次のようなことが考えられる。

- ① 管渠、ポンプ場等が組込めること
- ② 自然流下、圧力、洪水の各状態が扱えること
- ③ バイパス、分岐合流等の施設が組込めること
- ④ 実降雨データや設計降雨データに基づいたシミュレーションが行えること

- ⑤ 浸透、不浸透面積、流出係数等の当該区域の地域条件が組込めること

選定した3つの雨水流出解析モデルで以下の項目を確認するため、最上流端に1haの排水区で途中流入のない単純なモデルを用い、流量に関する試運転を行った。

基本条件は以下の通りである。

- ・管渠モデル：円形管
- ・降雨モデル：降雨強度一定
- ・流出モデル：流出係数 100%

降雨の初期損失は見込まない。

使用降雨の降雨量を表-3に示す。

表-3 使用降雨

	Run-1	Run-2	Run-3	Run-4
降雨量	50mm/h	100mm/h	200mm/h	50mm/h

・流量計算公式：マンニング式
流れの状況

- ① 自然流下状態流れ …… Run-1
- ② 圧力状態の流れ …… Run-2
- ③ 洪水発生時の流れ …… Run-3
- ④ 分岐と合流における流れ …… Run-4

降雨モデルは60分間連続降雨強度一定とする。計算した結果を示す。(表-4)

RUN-1, 2, 4では、流速、流量とも各モデルの間に大きな違いはみられなかった。また、RUN-3では、流速において一部差がみられるものの流速においては、ほぼ同程度の結果が得られた。

4. 実排水区でのシミュレーション

実際の排水区を対象とするシミュレーションを行うためには、排水系統に関するデータ、降雨量に関するデータ、降雨時の水量と水質に関するデータがそろっている必要があるが、特に降雨時の水質に

関するデータの蓄積はまだ少ない状況にある。

建設省土木研究所では、「合流式下水道の雨天時下水に関するデータベース」(土木研究所資料第1478号, 昭和54年1月, 建設省土木研究所下水道研究室)や、「下水道施設設計の合理化に関する調査報告書(4)」(土木研究所資料第1704号 昭和56年8月, 建設省土木研究所下水道研究室)などに、降雨時の水質に関するデータを整理している。

今回、実際の排水区を対象とするシミュレーションを行うため、上記の資料の中から、排水区域がシミュレーションに適当な面積(40ha程度)であること、排水系統に関するデータが入手可能なこと、特殊な流入水がないことなどの条件を満たす、K排水区を選定した。

K排水区の概要は以下の通りである。

排水面積	約35ha
排除方式	合流式
人口	8,840人
人口密度	252人/ha
土地利用	住居地域 61%
	商業地域 25%
	近隣商業地域 14%
工種別面積構成	屋根 30%
	舗装道路 13%
	その他 57%
管径	25~1650mm
管渠延長	約11,300m

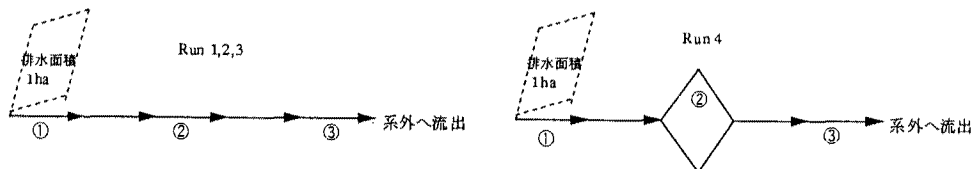


図-1 各Run概略図

表-4 計算結果

流れの状況	Run 1				Run 2				Run 3				Run 4																			
	自然流下状態								圧力状態								洪水発生時								分岐と合流							
設定した管渠の諸元	○400 20m×5 6%								○400 20m×5 6%								○400 20m×5 6%								○400 20m×4 途中○300 20m×2 6%							
管番号	手計算	H/w	MOUSE	SWMM	手計算	H/w	MOUSE	SWMM	手計算	H/w	MOUSE	SWMM	手計算	H/w	MOUSE	SWMM																
①	流速(m/s)	1.445	1.442	1.448	1.443	1.735	1.639	1.722	1.716	—	2.712	3.177	3.460	1.445	1.444	1.484	1.462															
	流量(m³/s)	0.139	0.139	0.139	0.139	0.278	0.278	0.278	0.278	—	0.434	0.449	0.457	0.139	0.139	0.139	0.139															
②	流速(m/s)	1.445	1.442	1.463	1.443	1.735	1.655	1.730	1.728	—	2.931	3.284	3.330	—	1.026	1.040	1.045															
	流量(m³/s)	0.139	0.139	0.139	0.139	0.278	0.278	0.278	0.278	—	0.434	0.444	0.431	0.070	0.069	0.069	0.069															
③	流速(m/s)	1.445	1.461	1.534	1.440	1.735	1.672	1.760	1.709	—	3.189	3.455	3.405	1.445	1.461	1.534	1.490															
	流量(m³/s)	0.139	0.139	0.139	0.139	0.278	0.278	0.278	0.278	—	0.434	0.444	0.431	0.139	0.139	0.139	0.139															

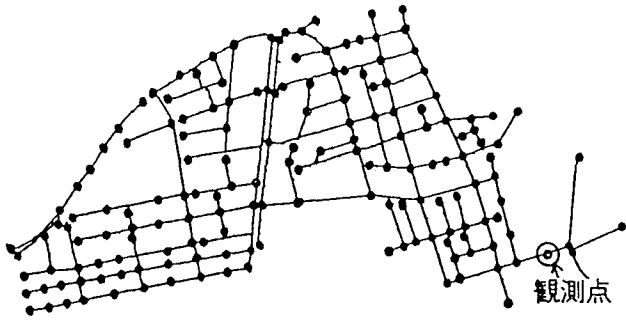


図-2 K排水区域管渠系統平面図

対象とした降雨は1977年9月19日（降雨継続時間6時間20分、総降雨29.9mm）である。

各モデルの流量、BOD、SSのシミュレーション結果を、実測値と合わせて図-3に示す。

流量の結果は、各モデルともピークの位置、形状とも概ね一致した。

BODは、モデルによってピークの時刻は若干ずれているが、各モデルともピークの高さは合っている。XP-SWMM、MOUSEはピーク以後もほぼ実測値と同じ傾向を示すが、HydroWorksは大きな数値を示した。

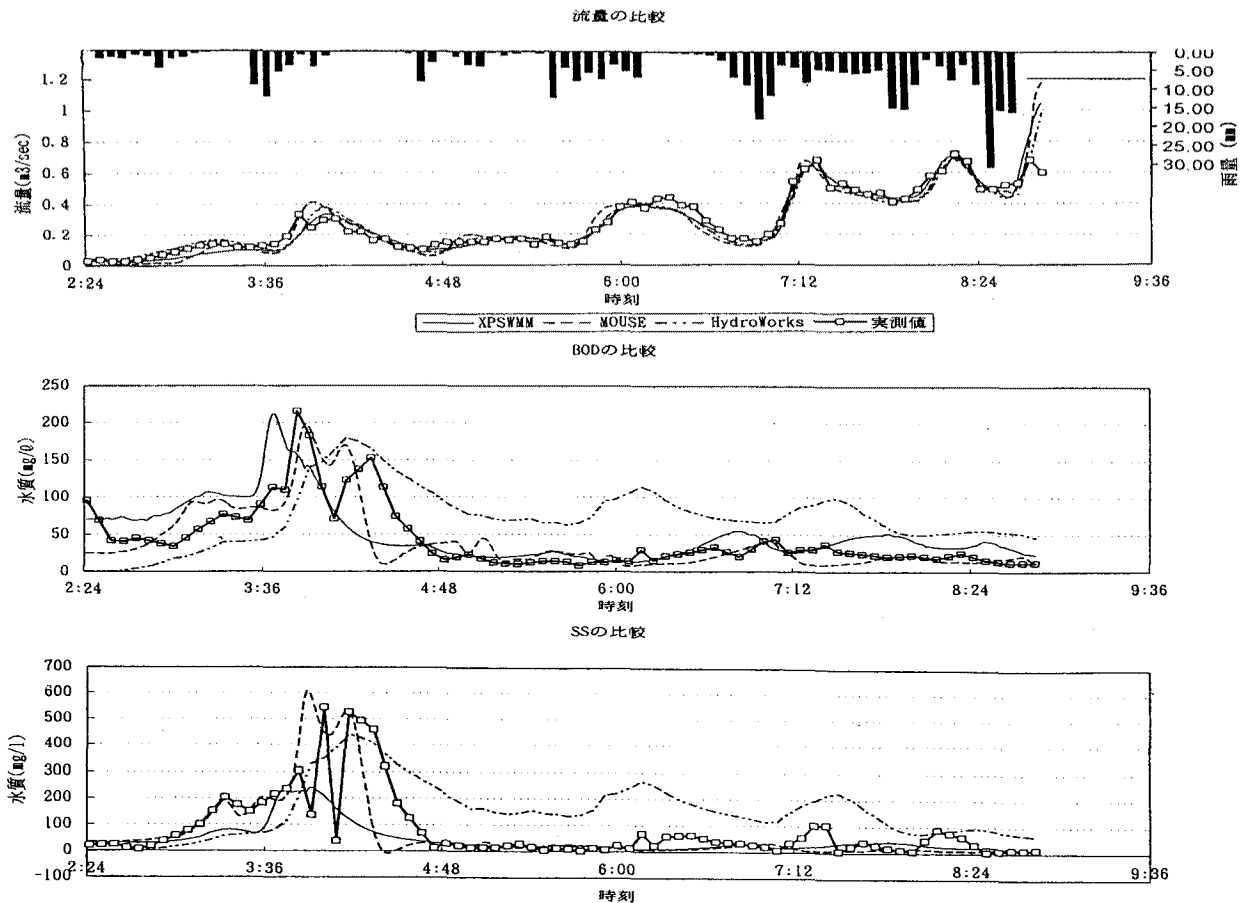
SSにおいて、MOUSEは、ほぼピーク値が実測値と一致している。HydroWorksは、低めであるが、ピーク値に近い、ただし、以降は高めの数値である。XP-SWMMのピーク値は実測値の半分以下の結果となった。

3つのモデルとも流量に関しては、概ね良い結果が得られたが、汚濁負荷に関しては、まだ、十分に良い結果が得られていない。これは、汚濁負荷の堆積、掃流の基本式の選択や基本式の係数、指数が不明であることや晴天日継続日数の設定によるものと思われる。

5. まとめと今後の課題

本年度の調査では、近年コンピュータ技術の進展により開発された海外の汚濁負荷量流出解析モデルについて、平成6年度調査で選定された3つのモデル（HydroWorks、MOUSE、XP-SWMM）を用いたシミュレーションを実施した。その結果、3つのモデルともに、流量のシミュレーションについては、ほぼ適用可能であることが分かった。

水質や汚濁負荷量のシミュレーションは、各モデルとも堆積や掃流等の過程において多くのパラメー



タを必要としている。しかしながら、日本において、これまで、あまりデータを収集していないものも多く十分なシミュレーションができないことが判明した。

今後は、さらに各モデルの内容について調査を進

め、日本の下水道に適用させるにはどのようなデータが必要が明らかにし、また、大規模な流域に対して適用する場合の課題について検討する必要がある。

● この調査に関する問い合わせは

建設省土木研究所下水道部

下水道研究室長

田中 修司

建設省土木研究所下水道部

下水道研究室主任研究員

榊原 隆

研究第二部長

藤田 昌一

技術部主任研究員

百崎 和博

研究第二部主任研究員

千葉 恭人

技術部研究員

古北 克

研究第二部研究員

宮田 篤