

大規模な都市雨水排水システムにおける流出シミュレーション
Runoff Simulations in Urban Storm Drainage System

愛媛大学工学部 正 員 豊 国 永 次
愛媛大学工学部 正 員 渡 辺 政 広

1. はじめに

都市雨水排水システムにおける流出は、各種流出面における雨水損失および表面流出の不均一性、ならびに管渠システムで発生するサーチャージ流れ、さらに浸水はらん（地表面たん水）などにより、かなり複雑なものとなっている。これまで、こうした都市域の雨水流出プロセスを組み入れた流出シミュレーション・モデル^{1),2)}を提示し、主として、調査流域（松山市街地域）における1幹線排水規模の区域（0.234km²）を対象に詳細な検討^{1)~4)}を進め、本モデルの有用性を明らかにしてきた。

本報告では、これらの研究結果をもとに、さらに大規模な排水管渠システムからなる都市域の雨水流出を実用上の精度で解析できる流出シミュレーション法、ならびにその適用性について松山市街地域（6.46km²）を対象として検討した。はじめに、現地調査結果をもとに流域のモデリングを進め、実用上簡便な等価流域モデル（Model I）を構成した。次に、調査流域で発生した中小規模の出水、ならびに浸水はらんを伴う大出水を対象に流出シミュレーションを行い、これらの結果を実測結果と対比して検討を進めた。

2. 都市流出シミュレーション・モデル²⁾

これまで検討を進めてきている都市域の流域モデリングと流出シミュレーションの方法を、図1に示す。本シミュレーション・モデルは、流域のモデリング、雨水損失（有効降雨）の評価、表面流の追跡、管渠システム流出の追跡の4つのブロックから構成されている。

i) 流域モデリング；実流域の現地調査結果をもとに、まず流域を幾つかの小支線区域に分け、各区域について規格化した幾つかの代表流出面と、小支線、支線、幹線の各管渠とからなる基準流域モデル（Modular Model）を構成する。この基準流域モデルをもとに、等価流域表示の手法を用いて流域モデルの単純化を系統的に進め、解析目的と所要精度に応じた各レベルの等価流域モデル（Model III, II, I）を構成することができる。大規模な雨水排水システムにおける実用解析では、流域を幾つかの幹線区域に分け、各区域を単一の等価斜面と幹線管渠で表示する等価流域Model Iを採用することとする。

ii) 雨水損失の評価と表面流の追跡；基準流域モデルでは、各代表流出面における雨水損失が、和風屋根を除く不浸透流出面では凹地貯留、浸透流出面では浸透損失と凹地貯留からなるとして取扱う。等価流域モデルでは、各等価斜面の雨水損失を、各代表流出面での雨水損失とそれら流出面の占有面積率より算定する。なお、各流出面ならびに等価斜面上の雨水流は、kinematic wave流れとして取扱う。

iii) 管渠システム流出の追跡；都市域の排水管渠システムでは、開水路流れ、サーチャージ流れ、さらには浸水はらんを伴う流出がしばしば現れ

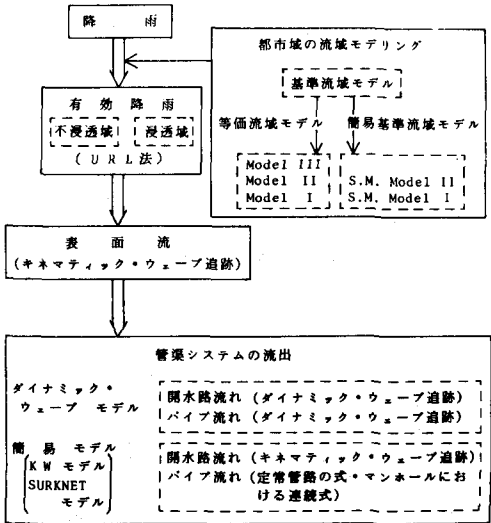


図1 都市雨水流出シミュレーション・モデル

る。こうした流出を精度高くシミュレートするには、① 管渠システムの流れを一貫して dynamic wave として追跡するDWモデル、② あるいは米国および欧州諸国で実用されている EXTRAN モデル⁵⁾を、③ また実用を主にシミュレートするには、開水路流れに対してkinematic wave近似、サーチャージ流れに対して定常管路の式を適用する簡便な流出モデル(KWモデル、SURKNETモデル⁶⁾)を、それぞれ解析目的と所要精度に応じて選択することになる。大規模な雨水排水システムからなる都市域において、浸水はんらんを伴う出水まで解析するには、実用上の立場から上述の等価流域Model I と、管渠流出にDWモデルを組み合わせた流出シミュレーション・モデルを用いることにより、流域内で発生する出水の主要な流出特性を実用上の精度で再現できるものと考えられる。

3. 調査対象流域と流域モデリング

3.1 調査流域

松山市の中心部を占める松山市街地域を調査対象に選んだ。本流域は図2に示すように、流域面積 6.46 km²、1号～6号幹線の管渠総延長 17.4km のかなり規模の大きい雨水排水システムからなる流域である。流出面構成は、不透透域が67%、浸透域が33%を占めている。排水管渠システムは、1～6号幹線とこれらに接続する多数の支線、小支線の各管渠からなり、雨水の排除方式は合流式である。幹線管渠システムの管渠諸元についてみると、上流から下流へ向け、管径は0.5～1.8m、こう配は中・下流部の幾つかを除いて1/125～1/1000と全体にはやや急である。なお、1号幹線上流部と5号幹線下流端には雨水吐き室が設置されており、ある流量値を上回る流出水は、それぞれ都市排水河川である宮前川および中の川へ放流される。

本流域の水文観測・調査は昭和49年より推進されてきている。図2に示すように、雨量は5地点、流量は3号幹線(Water gauge 3)と流域下流端(Water gauge 2)の2地点で観測されている。

3.2 流域モデリング

調査流域の流出に関与する各流出面ならびに管渠、さらに地表面こう配などの諸量を現地調査した結果をもとに、まず実状に近い雨水流出システムをもつ基準流域モデルを作成した。次に、この基準流域モデルをもとに、等価流域表示の手法を用いて流域モデルの単純化を系統的に進め、図3および図4に示すように、流域の流出システムを10区域の等価斜面と幹線管渠へとランピングした等価流域Model I を作成した。各区域の等価斜面ならびに幹線の諸元を、表1および表2に示す。

等価流域モデルを用いる解析で重要となる斜面の等価粗度は、上述した流出に関与する諸量の調査結果をもとに算定され、表1に併示する結果を得た。これらより、等価粗度は各区域で異なり、草地・裸地の多いII₁区における0.032から、建物の密集するIV₁区における0.003まで、区域内の流出システムの

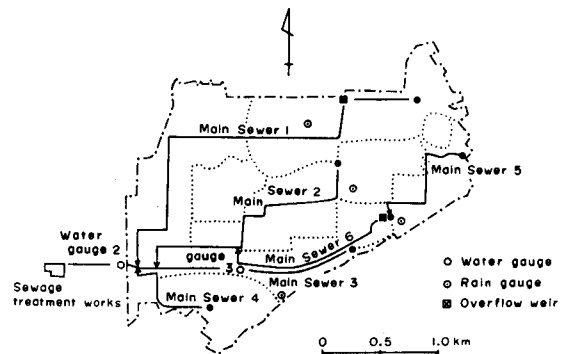


図2 調査流域の幹線管渠システムと雨量・流量観測地点

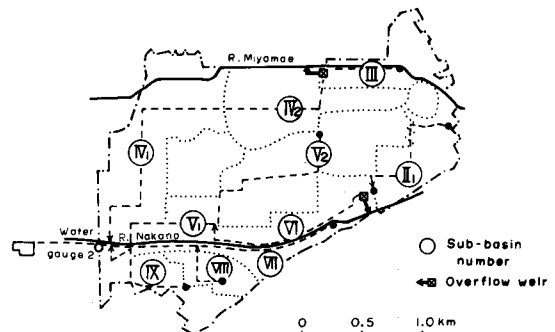


図3 調査流域とその流域分割

構成に応じてかなり変化している。

次に、等価流域Model I の幹線管渠システムは、図5に示すように、156本の管渠（90～140mm）とこれらをつなぐ各マンホールとから構成されている。なお、浸水はらんを伴う出水時、これらマンホールより地表面上へ溢水した流出水は、実用上、マン

表1 等価斜面の諸元 (Model I)

等価流域番号	等 価 斜 面			
	斜面長 (m)	断面数 (個)	こう配 (m/m)	等価面積 (m ² ・s)
III	223	2	0.005	0.0045
IV ₂	379	2	0.005	0.0098
IV ₁	265	2	0.005	0.0033
V ₂	261	2	0.005	0.0055
V ₁	134	2	0.004	0.0037
VII	121	1	0.004	0.0057
IX	264	1	0.005	0.0027
II ₁	171	2	0.006	0.0019
VI	250	1	0.005	0.0034
VIII	240	1	0.004	0.0081

表2 幹線管渠の諸元 (Model I)

等価流域番号	幹 線 管 渠			
	管渠延長 (m)	こう配 (m/m)	管径 (mm)	流速 K, V
III	1300	0.005	1100	0.45, 0.78
IV ₂	1211	0.005	1100	0.45, 0.78
IV ₁	2522	0.003	1500	0.58, 0.78
V ₂	2416	0.005	1100	0.46, 0.78
V ₁	1141	0.004	1500	0.50, 0.77
VII	2345	0.004	1000	0.50, 0.77
IX	1768	0.002	1100	0.65, 0.79
II ₁	1496	0.0045	1100	0.49, 0.76
VI	1991	0.006	900	0.43, 0.76
VIII	1260	0.0035	700	0.54, 0.76

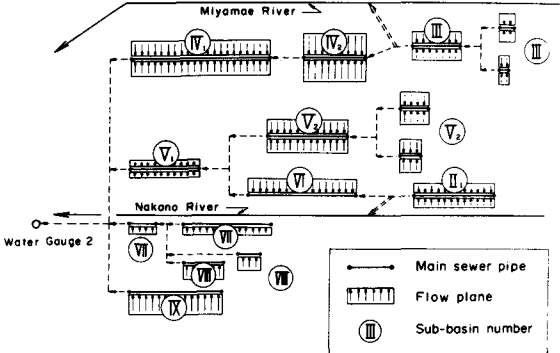


図4 調査流域の等価流域 Model I

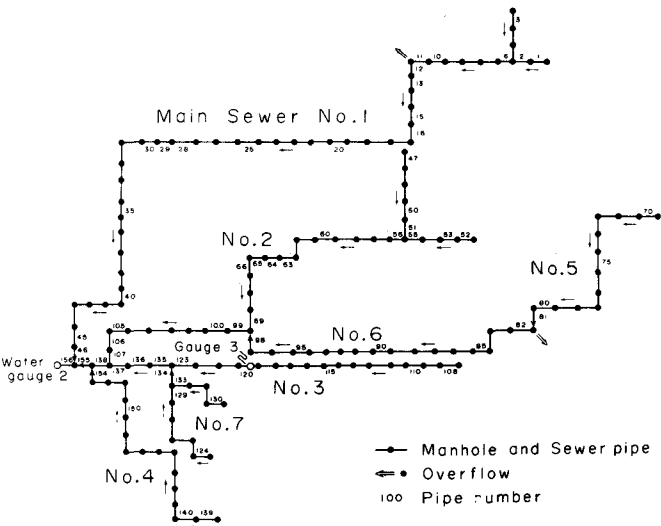


図5 等価流域Model I の幹線管渠システム

ホール地点を含む特定面積のたん水域に水平貯留されるものとして取扱う。

4. 流出シミュレーション結果と考察

上述した実用上の等価流域Model I と、管渠システムにKWモデル、ならびにDWモデルを用いる流出シミュレーション法の適用性について、はじめに、管渠システムの流出が主として開水路流れの中小出水を対象に、本法によるシミュレーション結果を実測結果と対比して検討した。次に、松山市街地域で既往最大級の浸水はらんが発生した昭和54年 6月の梅雨前線豪雨を対象に、管渠システムにDWモデルを用いて流出シミュレーションを行い、浸水はらんを伴う出水の主要な流出諸特性を吟味すると共に、浸水はらんの発生状況を実測結果とも対比して検討を加えた。

4. 1 中小出水に対する検討

調査流域で発生した通常の中小出水を対象に、管渠システムに実用上簡便なKWモデル、ならびに詳細なDWモデルを適用して流出シミュレーションを行い、これらの結果を対比すると共に、実測結果とも対比して、大規模な排水管渠システムからなる実流域における本シミュレーション法の適用性を調べた。

シミュレーション結果を実測結果と対比して、図6、7に示す。まずDWモデルを用いるシミュレーション結果を実測結果と対比すると、詳細な立場からは、雨水損失の大きい出水初期、ならびに局所的効果の現れやすい中小の流出ピークの部分で適合度が低下する傾向が見うけられる。しかしながら、実用上の立場からは、およそ出水の全体を通じて十分実用しうる精度のシミュレーション結果が得られていると言える。

次に、KWモデルを用いるシミュレーション結果をDWモデルによる結果、ならびに実測結果と対比すると、出水期間を通じて、DWモデルによる結果とほぼ同程度のものとなっている。なお、図6、7に示す中小出水の流出ピークにおいて、サーチャージ流れが発生し、これに伴って背水の影響が現れるが、こうした管渠区間は管渠システム全体の10~20%程度までで比較的小規模のものであった。

これらより、大規模な排水管渠システムからなる都市域において、中小出水（小規模のサーチャージ流れを伴う出水を含む）を対象とする流出解析を行うとき、等価流域Model I と管渠システムにKWモデルを用いる簡便な流出シミュレーション法は実用上有用なことが分る。

4. 2 浸水はらんを伴う出水に対する検討

調査流域の松山市街地域では、図8に示す昭和54年6月の梅雨前線豪雨時、排水管渠システムの各所でマンホール溢水が現れ、これに伴う浸水はらん区域は大小40数箇所に及び、その規模も既往最大級に達した。これらの浸水はらん区域の中で特に顕著であった7つの区域（A~L）を図9に示す。A、B、F、G、I、Kの支線沿いの区域では、およそ100~400mにわたる区間のマンホールから溢水が起り、湛水深は車道全面に及ぶ。幹線沿いのD、H、J、L区域では、さらに規模が大きくなり、特にD、Hの区域の溢水は、幹、支線延長800~1000mに及び、湛水深も全般的に0.1~0.4mに達している。

そこで、上述の浸水はらんを伴う出水について、等価流域Model I と管渠システムにDWモデルを組み合わせた流出シミュレーション・モデルを適用した。

降雨ハイトグラフと流域下流端（Water gauge 2）で観測した水位ハイドログラフ（下流端境界条件）を与えて流出シミュレーションを行った結果を、図8、10、11に示す。これらのシミュレーション結果を詳細に吟味すると共に、実測結果（図8、9）と対比して検討を加えた結果、大規模な排水管渠システムにおける浸水はらんを伴う出水の諸特性、ならびに本シミュレーション法の適用性について、次の諸点が指摘される。

i) サーチャージ流れと地表面たん水の発生について；梅雨前線豪雨時、幹線沿いに多数の浸水はらん区域が発生した1号幹線について、その中・下流部におけるシミュレートされた水位変動の状況を図11に示す。これより、通水能が特に小さいN0.43 管渠（図5）では、11時前後における10数mm/hrの降雨（図8）

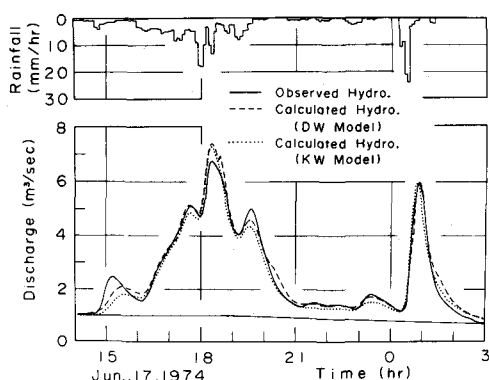


図6 流出シミュレーション結果（中小出水）

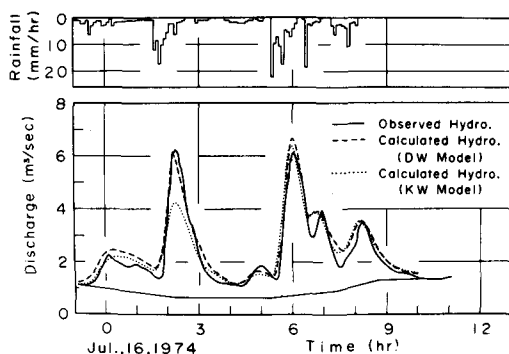


図7 流出シミュレーション結果（中小出水）

によって、かなり早い時期にサーチャージ流れが現れる。このため、これより上流の低地で地表面たん水が早く、かつ大きく現れる特性がみられる。

ii) 浸水はらん域の発生状況について；等価流域Model I を用いる本シミュレーションによって再現された幹線沿いの主要な浸水はらん区域（13時30分～15時30分）を図10に示す。これを図9の観測調査結果と対比すると、詳細には、C、H区域での発生区間に多少の差異がみられるが、主要地点におけるはらん発生箇所ならびにたん水規模はいずれもよく対応している。

iii) 流域下流端の流量ハイドログラフについて；シミュレートされた流量ハイドログラフ（図8）におけるサーチャージ期間の変動特性をみると、浸水はらんに伴う流出抑制の効果はかなり大きいものとなることとが分る。

以上、大規模な排水管渠システムからなる都市域において、浸水はらんに伴う出水を実用的に解析するにあたり、現在なお幾つかの検討課題を残しているものの、等価流域Model I と管渠システムにDWモデルを組み合わせた本シミュレーション法はきわめて有用であることを示唆している。

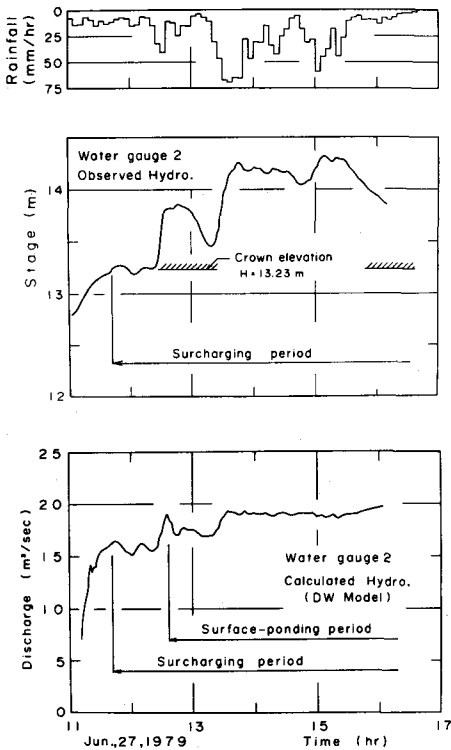


図8 降雨・水位記録と流出シミュレーション結果（昭和54年梅雨前線豪雨時、Water gauge 2）

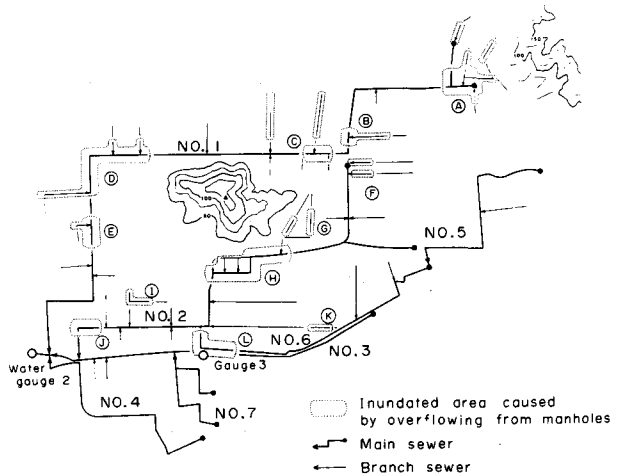


図9 調査流域における浸水はらんの観測・調査結果（昭和54年梅雨前線豪雨）

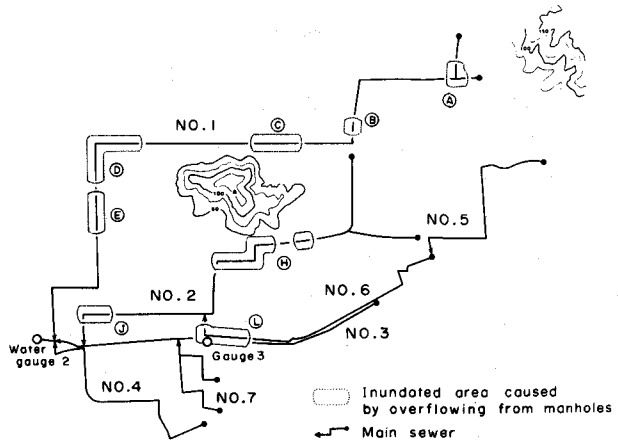


図10 シミュレートされた主要な浸水はらん区域（等価流域Model I，DWモデル）

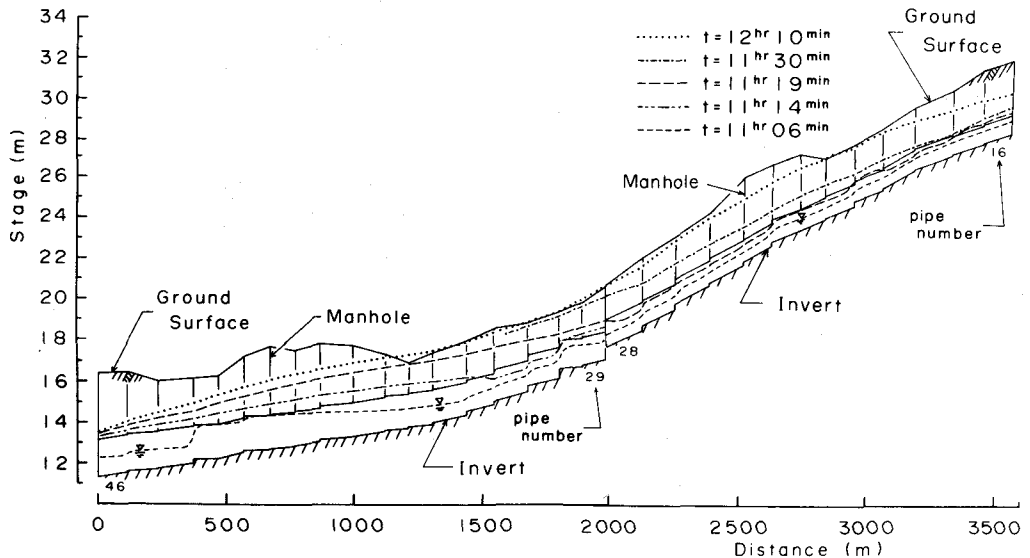


図11 幹線管渠システムにおける水位変動状況（1号幹線中・下流部）

5. おわりに

本報告では、これまで研究を進めてきている都市流出シミュレーション・モデルの研究結果をもとに、さらに大規模な排水管渠システムからなる都市域の雨水流出を実用的に解析する方法について検討を進め、その有用性を示唆することができた。今後、残された課題について一層詳細な検討を進めてゆくと共に、流出モデルの簡易化についても検討を加えてゆきたい。なお、本研究は文部省科学研究費による成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) Toyokuni, E. and Watanabe, M.: Application of Stormwater Runoff Simulation Model to Matsuyama City Drainage Basin, Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage, pp.555-564, Göteborg, Sweden, 1984.
- 2) 豊国永次・渡辺政広 : 都市流出シミュレーションモデルとその調査流域への適用, 第29回水理講演会論文集, pp.43-48, 1985.
- 3) Toyokuni, E. and Watanabe, M.: Stormwater Runoff Simulation for Research Basin in Matsuyama City, Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, pp.125-136, Dubrovnik, Yugoslavia, 1986.
- 4) 豊国永次・渡辺政広 : 都市域の雨水排水管渠システムにおける流出特性と浸水対策シミュレーション, 第30回水理講演会論文集, pp.151-156, 1986.
- 5) Roesner, L. A., Shubinski, R. P. and Aldrich, J. A. : Storm Water Management Model User's Manual, Version 3. Addendum 1. EXTRAN, Report No. EPA-600/2-84-109b, Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA, 1981.
- 6) Yen, B. C. and Pansic, N. : Surge of Sewer Systems, WRC Report No. 149, University of Illinois, USA, 1980.