

SWMM法の汚濁負荷流出への適用性について

On Application of SWMM to Stormwater Runoff Quality Analysis

神田 徹*・神吉和夫**・ゴッパギャウ マノーマイピブーン***

By Tohru KANDA, Kazuo KANKI, Kobkaew MANOMAIPIBOON

In this paper, SWMM using Runoff Block and Transport Block is applied to stormwater runoff quality analysis for a sewer system at Kobe. Model parameters such as buildup of pollutant, power(or exponent) for runoff rate, are discussed by use of previous researches and then determined through the present studies. The result of computation employing the value of model parameters obtained in this study, shows a good agreement with the observed data except some cases

Keywords : SWMM, water quality simulation, separated sewer system

1. はじめに

下水道は都市環境の改善を目的として整備され、敷設の進んだ大都市では水環境系の重要な要素となっている。筆者らは、SWMM法(Storm Water Management Model)とGISと結びつけた下水道での流出予測モデルの構築を行ってきた¹⁾。本研究では、同様の試みを汚濁負荷流出にも適用することを前提として、実下水道(分流式、雨水)での観測データをもとに、SWMM法による汚濁負荷流出解析のための排水域分割を含む各種パラメータについて基礎的検討を加えた。

汚濁負荷流出モデルとしては、SWMM法以外にも従来のモデルとして、土研モデル、STORM、タンクモデルなどがある。しかし、各モデルとも①各種定数の決定の難しさ、②比較的小規模の流域にしか適用できない、③現実を大胆にモデル化している、④下水道システムの適用に不向き、などの問題があることが指摘されている²⁾。SWMM法を用いた汚濁負荷流出解析において、渡辺らの研究³⁾では米国で一般に使われているモデル・パラメータを一部そのまま使用している。SWMM法は米国で汎用されているが、日本とは地形条件、降雨特性、下水道システムも異なっており、わが国での適用にあたってはモデル・パラメータ値などの再検討が必要と考えられる。

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部建設学科

*** 学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程建設学専攻

2. SWMM法による汚濁負荷流出解析

SWMM法は、米国環境保護局（U.S.EPA）が開発した都市域における雨水流出、水質に関する総括的シミュレーションモデルである。1971年以来、改良が重ねられてきており、ここではVer.4（1988）を用いる。SWMM法の汚濁負荷流出モデルでは、①排水域の降雨流出・地表面汚濁負荷流出をRunoffモデルのみで計算する方法と、②排水域の地表面汚濁負荷流出はRunoffモデルで計算し、下水管渠網での降雨流出・汚濁負荷流出はTransportモデルで計算して、両者を組み合わせる方法とがあるが、本研究では後者を用いる。その汚濁負荷流出モデルの概要を以下に示す。

2.1 Runoffモデル

(a) 地表面雨水流出 Runoffモデルでは排水域をサブキャッチメントに分割し、さらに浸透域・不浸透域、凹地貯留の有無などの基準によりサブエリアに分割し、各々を非線形のタンクと考える（図-1、図-2を参照）。基礎式を以下に示す。

$$\text{連続式：} \quad \frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai - Q \quad (1)$$

ここに、 V :貯留量、 d :水深、 A :サブエリアの面積、 Q :流出量、 i :有効降雨（=降雨強度－浸透能）。

$$\text{運動方程式：} \quad Q = W \frac{I}{N} (d - d_p)^{\frac{1}{2}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、 W :サブエリアの幅、 N :サブエリアの粗度係数、 d_p :サブエリアの凹地貯留、 I :サブエリアの勾配。

$$\text{浸透能：} \quad f_p = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) \exp(-kt) \quad (3)$$

ここに、 f :浸透能、 f_0 :初期浸透能、 f_{∞} :最終浸透能、 k :低減係数。

(b) 地表面汚濁負荷流出 地表面での汚濁負荷流出の運動方程式および連続式は、次式のように表される

$$\text{運動方程式：} \quad L = a \cdot r^b \cdot P \quad (4) \quad \text{連続式：} \quad \frac{dP}{dt} = -L \quad (5)$$

ここに、 L :汚濁負荷流出量、 r :有効降雨強度、 a :降雨強度係数、 b :降雨強度指数、 P :堆積負荷量。

2.2 Transportモデル

(a) 管渠網流出 下水道システムをエレメントに分割する。エレメントは、管渠に対応するlinkとマンホールに対応するnodeで構成されている（図-3を参照）。流出計算にはKinematic Wave法が用いられる。

$$\text{連続式：} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6) \quad \text{運動方程式：} \quad Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} A \quad (7)$$

ここに、 Q :流量、 A :流積、 R :径深、 n :マンニングの粗度係数、 I :管渠勾配。

(b) 管渠網汚濁負荷流出 link内では完全混合を仮定し、基本式は下記に示す。

$$\frac{dVC}{dt} = V \frac{dC}{dt} + C \frac{dV}{dt} = Q_m(t)C_m(t) - Q(t)C(t) - KC(t)V(t) + M(t) \quad (8)$$

ここに、 V :管渠内貯留量、 C :流出量濃度、 Q_m :流入量、 C_m :流入量濃度、 Q :流出量、 K :減衰係数、 M :管渠内の沈降負荷量または洗掘負荷量。

3. 実下水道システムへの適用

3.1 対象下水道および排水区の概要

対象とする下水道は神戸市A下水道排水区で、分流式排除方式の雨水渠である。排水面積は約21ha、幹線管

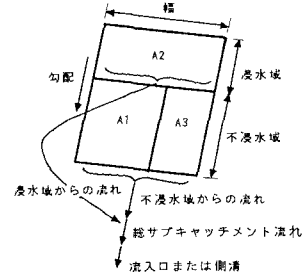


図-1 サブキャッチメント

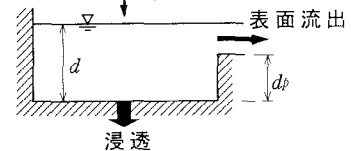


図-2 非線形タンクモデル

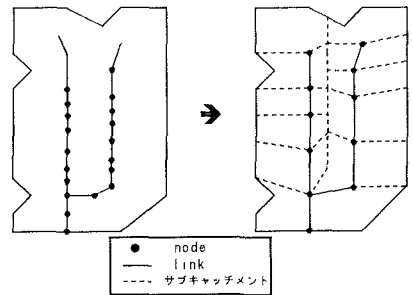


図-3 link-nodeの作成

渠総延長は約1,438mである。本排水区は、東西方向約200m、南北約770m、標高差約33mで、勾配は上流部で約6%の急勾配であるが、下流部約270mは3%～1.5%の平坦地となっている。

このA下水道排水区の土地利用は、東西に走る幹線道路および鉄道により、南北方向に比較的明確な地域的区分がみられる(図-4を参照)。降雨量、流量、水質観測データは、建設省土木研究所が1973年から1975年にかけて調査したものを用いた⁴⁾。

3.2 モデル化とパラメータ

(a) link-node系とサブキャッチメント

はじめに、排水域のサブキャッチメントおよびサブエリアへの分割と、下水管渠網のlink・node系へのモデル化が必要である(図-5参照)。これらのモデル化に当たっては、GISデータの有効利用の視点から、管渠設計時の亀甲割排水域、管渠・人孔系データをできるだけ採用する方法を用いた。

(b) パラメータ

・サブキャッチメント面積 A

管渠設計時に算定されているものを用いる。

・代表流下長

地形図(1/2,500)を用い、各サブキャッチメントの流下方向の長さをはかり決定する。

・幅 W

サブキャッチメントの代表流下長で面積を割ることにより求める。

・不浸透面積率 p

屋根、舗装道路、舗装駐車場などを不浸透域とし、公園、学校等の運動場、未舗装駐車場、空地(裸地)などを浸透域として扱う。本研究では、1/2,500の地形図を用いて浸透域面積を推計する。

・地表勾配 I

サブキャッチメントの上流端と下流端における地盤高の差を代表流下長で割ることにより求める。

・粗度係数 N

Engman⁵⁾は地表面舗装によって、コンクリートおよびアスファルトでは $0.01 \sim 0.013 m^{-1/3} \cdot s$ 、短い草地では $0.10 \sim 0.20 m^{-1/3} \cdot s$ などとしている。渡辺ら³⁾は不浸透域では $0.013 m^{-1/3} \cdot s$ 、浸透域では $0.15 m^{-1/3} \cdot s$ と設定している。

・凹地貯留 d_r

渡辺・豊國⁶⁾は都市域の流出解析において、不浸透域で2.5mm、浸透域で6.0mmという値を得ている。

・浸透能 f_p

渡辺・豊國⁶⁾は、初期浸透能 $f_0=20\text{mm/hr}$ 、終期浸透能 $f_\infty=5\text{mm/hr}$ 、低減係数 $k=1.51/\text{hr}$ としている。安藤ら⁷⁾は

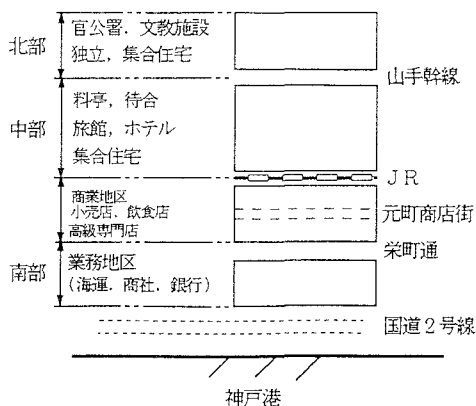


図-4 土地利用区分

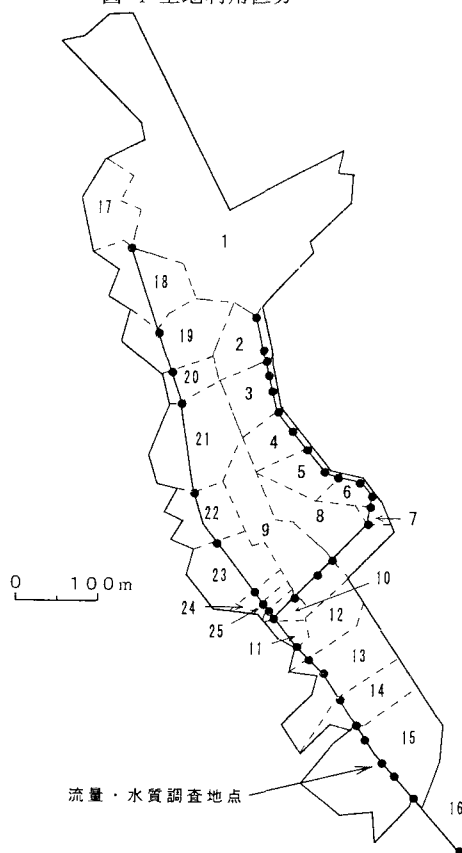


図-5 モデル化したA下水道排水区

散水型浸透計を用いて土地利用別の終期浸透能を得ており、その値は4mm/hr～15mm/hrである。渡辺ら³⁾は一定の値5.0mm/hrを用いた流出計算も行っている。

・初期堆積負荷量・ P_0

初期堆積負荷量については表-1, 2に示すような土地利用別の代表値がある²⁾。これは各サブキャッチメントの初期堆積負荷量を決定する際に参考にすることができる。また、渡辺ら³⁾は排水区が商業地区であるとして、初期堆積負荷量はSSについては1250～1890kg、BODについては26～167kgと設定している。

表-1 京都市および神戸市における路面初期堆積負荷量(平均値) 表-2 路面散水実験結果による表面の初期堆積負荷量(kg/ha)

用途地域	要素	BOD(g/m ²)	SS(g/m ²)
第1種住居専用地域		0.0198	0.6367
第2種住居専用地域		0.0448	0.8960
住居地域		0.0698	1.5884
商業地域		0.0501	1.0428
近隣商業地域		0.0607	2.7485
工業専用地域		0.1485	4.7878
工業地域		0.3482	18.711
準工業地域		0.2840	15.484

	BOD	COD	SS
屋根	0.2	0.3	2.2
路面(住宅地)	3	7	10
路面(商店街)	12	16	24
路面(工場街)	5	8	10

・降雨強度係数・ a

SWMM法のマニュアルでは、 a は汚濁物質粒子直径の減少、降雨強度の低下、サブキャッチメントの減少によって増加するように設定されている⁹⁾。 a が増加すれば流出量が大きく、ピーク出現時刻が早くなる傾向がある。 a の値は1～10が用いられている。渡辺ら³⁾はSSについて $a=0.01$ 、BODについて $a=0.02$ という結果を得ている。

・降雨強度指数・ b

SWMM法のマニュアルでは、 b の値は通常2.1～3.6(主に3)に設定され、流量の多い時には2に近い値に設定される⁹⁾。渡辺ら³⁾はSSおよびBODのいずれに対しても $b=2$ という結果を得ている。

・粒度分布、比重

京都市、神戸市で路面堆積負荷の調査²⁾では、堆積負荷の粒子径は0.25mm未満のものが1/2以上(重量比)を占め、微粒子が多いことやBODは工業系地域以外では8～9割が微粒子に含まれることなどが報告されている。渡辺ら³⁾は、SWMM法のマニュアル⁹⁾で紹介された粒度分布を適用している。

3.3 適用結果と考察

表-3 パラメータの設定値 (その1)

表-4 パラメータの設定値 (その2)

番号	土地利用パターン	W(m)	A(ha)	β (%)	I (m/m)
1	集合住宅	150	5.96	60	0.049
2	独立住宅	75	0.48	80	0.027
3	集合住宅	75	0.54	80	0.107
4	集合住宅	60	0.45	80	0.12
5	空地、公園	38	0.41	80	0.08
6	空地、公園	25	0.23	40	0.027
7	空地、公園	25	0.05	100	0.04
8	空地、公園	75	0.9	60	0.074
9	商業	30	1.15	80	0.071
10	商業	25	0.11	100	0.053
11	商業	25	0.11	100	0.027
12	商業	95	0.45	80	0.016
13	商業	125	1	100	0.008
14	商業	125	0.6	100	0.005
15	商業	160	1.57	100	0.003
16	工業	190	1.52	100	0.001
17	集合住宅	62	0.62	60	0.04
18	集合住宅	100	0.92	80	0.07
19	集合住宅	125	0.88	80	0.064
20	空地、公園	70	0.29	100	0.053
21	集合住宅	100	1.26	80	0.016
22	集合住宅	80	0.53	80	0.048
23	商業	100	0.77	80	0.04
24	商業	80	0.21	80	0.36
25	商業	65	0.12	100	0.057

入力データ	設定値
N 不浸透域 (m ^{-1/3} ・s)	0.01
浸透域 (m ^{-1/3} ・s)	0.2
d_p 不浸透域 (mm)	2 (先行晴天日数か2日の時15)
浸透域 (mm)	6 (先行晴天日数か2日の時55)
f_0 初期浸透能(mm/hr)	50
f_{∞} 終期浸透能(mm/hr)	5
k (l/sec)	0.001
n (m ^{-1/3} ・s)	0.014
P_0 初期堆積負荷量 (kg/ha/day)	SSについては13～87 BODについては14～15
a 降雨強度係数	SSについては0.2 BODについては0.1
b 降雨強度指数	SS, BODいずれも2
汚濁物質の比重	SSについては2.7 BODについては1.1

3.2(b)で挙げたパラメータの一部については値が一意的に決まらないので、適当な値を仮定してシミュレーションを繰り返し計算値と実測値の比較を行なった。降雨流出ハイドログラフ、汚濁負荷流出ポリュート

グラフの両方で良好な一致をみた時のパラメータの設定値を表-3.4に示す。

図-6, 7, 8に降雨流出の計算値と実測値の比較を示す。いずれも良好な一致を示している。次に、図-9, 10, 11に汚濁負荷流出の計算値と実測値の比較を示す。図-9, 10では計算結果と実測値は良好な一致を示しているが、図-11の場合は後半部で合わない。図-11のケースは2山の降雨があり、計算値は前半の降雨でほとんどの堆積負荷が洗い出される結果となっている。SWM法のRunoffモデルでは、降雨期間中の汚濁負荷の地表面への供給がないものとしており、モデル構成式、観測データに問題があるかもしれない。

パラメータ値については次のようなことがわかった。

- ・不浸透面積率：地形図から推計される値(平均で92.4%)では雨水流出が大きくなるので、各サブキャッチメントで40, 60, 80, 100%の4段階に不浸透面積率を変化させ、土地利用の違いや舗装条件を加味してシミュレーションを行っている。表-3に示すように、平均値は渡辺ら³⁾の用いた値(70%程度)に近い。

- ・凹地貯留：渡辺らの研究と比べると、不浸透域では0.5だけ小さく、浸透域では同じ値である。

- ・浸透能： $f_o \cdot f_\infty$ の組み合わせを50・5, 25・5, 25・1と変えても雨水流出結果に大きな変化が見られなかった。これは浸透面積率が少ないためと考えられる。

- ・ a, b ：渡辺ら³⁾の研究と比較すると、 a については近い値が、また b については同じ値が得られた。

- ・比重、粒度分布：比重、粒度分布を変化させても、汚濁負荷流出結果はほとんど変化がみられなかった。これはこの排水区は分流式で、勾配も大きく、流達時間も9.44分と短いので、沈殿と巻き上げがほとんどないことによると考えられる。

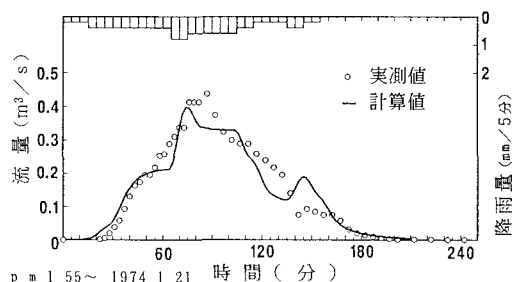


図-6 降雨流出シミュレーション(1)

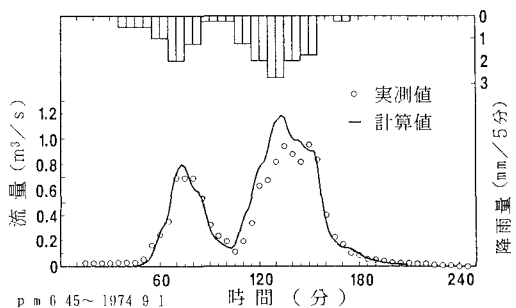


図-7 降雨流出シミュレーション(2)

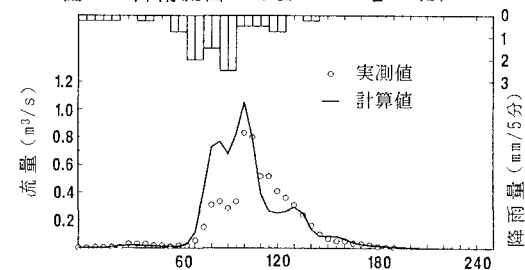


図-8 降雨流出シミュレーション(3)

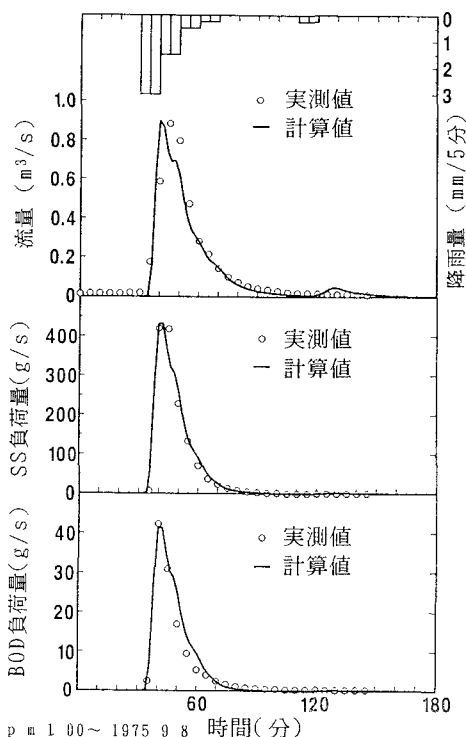


図-9 汚濁負荷流出シミュレーション(1)

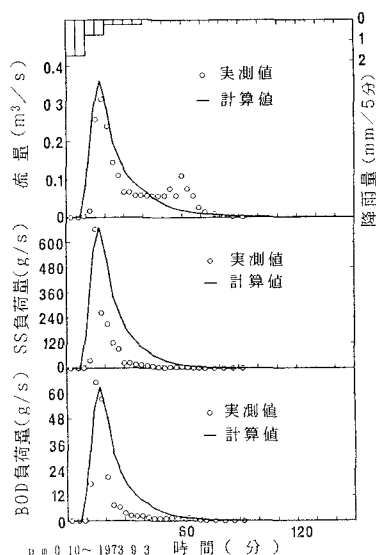


図-10 汚濁負荷流出シミュレーション(2)

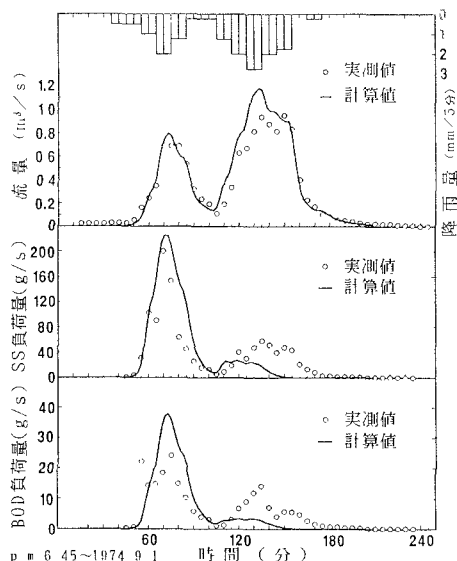


図-11 汚濁負荷流出シミュレーション(3)

4. おわりに

SWM法の汚濁負荷流出モデルを神戸市A下水道排水区に適用した結果、表-3,4のモデル・パラメータを用いた場合、降雨流出計算では実測値と計算値が一部を除き良好な一致をみた。

汚濁負荷流出では、表-4のモデル・パラメータを用いた結果、単峰性の降雨パターンに対しては実測値と計算値は良好な一致をみた。

SWM法は米国で汎用されており、またGISとの組み合わせが容易と考えられるので、都市下水道の計画・管理支援システムへの利用が有効と考えられる。その際、わが国での適用性を高めるために、モデル・パラメータ値等の検討を他の下水道でも行っていきたい。

謝辞 本研究の遂行に当たり、愛媛大学工学部渡辺政広助教授には種々ご教示をいただいた。記して、謝辞とする。

参考文献

- 1) 神田徹・神吉和夫・西山武志：下水道台帳データベースを利用した都市下水道の雨水流出解析システム，水工学論文集，第39巻，pp.67-72，1995。
- 2) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，1990。
- 3) 渡辺政広・時尾嘉弘・藤田和博：SWM-Runoff・Transportモデルによる汚濁負荷流出シミュレーション，愛媛大学工学部紀要，第14巻，pp.317-325，1995。
- 4) 建設省土木研究所：分流式下水道からの雨水流出水に関するデータベース，土木研究所資料 第1594号，1980。
- 5) Engman, E. T. : Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff, Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53, 1986。
- 6) 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，Vol. 8, No. 3, pp. 46-63, 1989。
- 7) 安藤義久・梶谷真・林利家：都市域における土地利用別の浸透能に関する研究，水文・水資源学会1989年研究発表会要旨集，pp. 33-36, 1989。
- 8) 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，建設省都市局下水道部監修。
- 9) Huber, W. C. and Dickinson, R. E. : Storm Water Management Version 4., User's Manual, EPA/600/3-88/001 a. Environment Protection Agency, Athens, GA, USA, 1988。