

(4) 非点源負荷における路面堆積負荷の定量と流出

シミュレーション

関西大学土木工学教室 和田 安彦
O 同 吉本 幸宏

1. 緒言

市街地での諸活動により、私達の身の回りには多くの汚濁物が発生し、堆積して、その堆積汚濁負荷のポテンシャルは非常に大きい。降雨の発生により、これらの汚濁負荷は路面等を通じて流出し、合流式下水道以外の排除システムでは、公共用水域に直接これらの負荷が流入して汚濁負荷の一因となっている。

これらの汚濁負荷の公共用水域への流入を減少させるためには、まず路面等の堆積負荷量を定量把握し、地域堆積分布や組成を明らかにして、それらの負荷が降雨によってどのように流出するのか等を検討する必要がある。

ここでは、路面堆積負荷量の定量を行ない、その堆積負荷特性を用途地域別に明らかにし、降雨時の堆積負荷流出を流出負荷シミュレーションを通じて検討考察する。

2. 路面堆積負荷の定量

路面堆積負荷は、大気からの降下物や、車の排ガス、タイヤ等の摩耗による交通や人の往来によって路面に生じた総負荷量を表わしたものである。

筆者らが京阪神都市域で調査した路面堆積負荷は表-1に示すもので、住居専用地域は一般に少なく、昔から住宅街である住居地域は商業地域のそれよりも比較的多く、工業地域は堆積負荷量の多いのが特徴で

ある。路面堆積負荷量は用途地域別に区分しうる。住居地域では、BOD $0.0589 \sim 0.0806 \text{ g/m}^2$ SS $0.694 \sim 2.483 \text{ g/m}^2$ で、Sartor⁴⁾らの調査結果よりやや多いものの、オーダー的には一致している。なお、表中の固：付は路面負荷の固形物と付着物の割合を表わしている。

3. 路面堆積負荷流出モデル

(1) STORMモデル

路面等の堆積負荷量の流出は、STORM²⁾では降雨強度と総括流出減衰係数によって特徴づけられるとし、地表面負荷流出量 M_p は式-1で表わされる。

$$M_p = A \cdot P \cdot (1 - e^{-K \cdot R \cdot \Delta t}) / \Delta t \quad (1)$$

ここで、A：路面等の面積、P：単位路面堆積負荷量、K：総括流出減衰係数（流出減衰係数×流出係数）、R：降雨強さ、 Δt ：単位時間である。

式-1が路面等の堆積負荷の流出特性を表わした運動式である。負荷流出においてはさらに堆積負荷の連続式を考える必要がある。

表-1 用途地域別単位面積路面堆積負荷量

用途地域	BOD (g/m ²)				SS (g/m ²)				NH ₄ -N (g/m ²)			
	範囲	平均	固：付	固：付	範囲	平均	固：付	固：付	範囲	平均	固：付	固：付
第1種住居専用地域	0.0197~0.0198	0.0198	14：86	0.5337~0.7497	0.6367	91：9	0.00042~0.00069	0.00056	18：82			
第2種住居専用地域	0.0283~0.0612	0.0448	6：94	0.5625~1.3177	0.8960	92：8	0.00069~0.00090	0.00078	19：81			
住居地域	0.0589~0.0806	0.0698	16：84	0.6937~2.4831	1.5894	42：58	0.00090~0.00177	0.00134	54：46			
商業地域	0.0406~0.0516	0.0501	11：89	1.0163~1.0993	1.0428	32：68	0.00154~0.00183	0.00169	22：78			
近隣商業地域	0.0374~0.0799	0.0607	5：95	0.393~1.3883	2.7485	27：73	0.00063~0.00182	0.00106	21：79			
工業専用地域	0.0873~0.2095	0.1485	47：53	0.7626~8.813	4.7878	88：12	0.00222~0.00987	0.00605	75：25			
工業地域	0.1523~0.544	0.3482	88：12	5.701~31.721	18.711	97：3	0.00664~0.03423	0.02044	69：31			
準工業地域	0.0339~0.7268	0.2840	85：15	1.3002~43.174	15.484	93：7	0.00107~0.04579	0.01659	39：61			
用途地域	C _u (10 ⁻³ g/m ²)				C _w (10 ⁻³ g/m ²)				P _b (10 ⁻³ g/m ²)			
	範囲	平均	固：付	固：付	範囲	平均	固：付	固：付	範囲	平均	固：付	固：付
第1種住居専用地域	1.53~77.9	39.7	90：10	1.52~2.98	2.25	8：92	0.25~0.60	0.43	2：98			
第2種住居専用地域	14.5~175	88.4	2：98	1.44~2.88	2.18	14：86	0.37~1.17	0.66	3：97			
住居地域	10.09~21.7	15.9	52：48	2.57~3.35	2.96	50：50	0.48~0.58	0.53	5：85			
商業地域	38.9~48.3	43.6	9：91	2.01~2.54	2.28	36：64	0.36~0.59	0.48	8：92			
近隣商業地域	19.9~46.9	39.1	8：92	1.43~4.05	2.48	38：62	0.17~0.77	0.43	5：95			
工業専用地域	41.5~257.0	149.0	34：66	2.13~18.66	10.40	80：20	0.18~1.19	0.69	68：32			
工業地域	139.1~394	266	84：16	15.1~70.0	42.6	97：3	0.96~3.76	2.36	72：28			
準工業地域	198~556	325	86：14	2.19~92.7	33.2	96：4	0.24~5.10	2.01	79：21			

(2) 流出負荷のとらえ方

路面堆積負荷の流出は、一般に次のように考えられる。

- 1) 降雨流出後、15分以内にかなりの堆積負荷が流出し、初期降雨流出負荷量が多い。
- 2) 流出負荷は降雨強度に強く影響される。
- 3) 堆積負荷の中で粒子径の小さいものの流出が特に早くて大きい。

これらの諸特性をモデルに適切に表わすことが必要となる。

(3) 路面堆積負荷流出モデル

路面に堆積する負荷量は、都市活動が1日ごとにほぼ一定として、単位面積当たり毎日同じ負荷量 $a(\text{g}/\text{m}^2)$ が堆積し、それが n 日間続くものとする。堆積した負荷量は1日ごとにある減衰係数で減少する。 n 日間に清掃のある場合とない場合において、単位面積当たりの堆積負荷量はそれぞれ次のように表わされる。

1) 清掃のない場合 ($n < N_0$)

$$P(n) = P_0 e^{-Kn} + \frac{a(1-e^{-Kn})}{1-e^{-K}} \quad (2)$$

2) 清掃のある場合 ($n \geq N_0$)

a) 1回清掃

$$P(n) = \left\{ P_0 e^{-K \cdot N_0} + \frac{a(1-e^{-K \cdot N_0})}{1-e^{-K}} \right\} (1-E) e^{-K(n-N_0)} + \frac{a \{ 1-e^{-K(n-N_0)} \}}{1-e^{-K}} \quad (3)$$

b) 2回清掃

$$P(n) = \left[\left\{ P_0 e^{-K \cdot N_0} + \frac{a(1-e^{-K \cdot N_0})}{1-e^{-K}} \right\} (1-E) e^{-K N_0} + \frac{a(1-e^{-K \cdot N_0})}{1-e^{-K}} \right] (1-E) e^{-K(n-2N_0)} + \frac{a \{ 1-e^{-K(n-2N_0)} \}}{1-e^{-K}} \quad (4)$$

c) 3回清掃

$$P(n) = \left[\left[\left\{ P_0 e^{-K \cdot N_0} + \frac{a(1-e^{-K \cdot N_0})}{1-e^{-K}} \right\} (1-E) e^{-K N_0} + \frac{a(1-e^{-K \cdot N_0})}{1-e^{-K}} \right] (1-E) e^{-K N_0} + \frac{a(1-e^{-K \cdot N_0})}{1-e^{-K}} \right] (1-E) e^{-K(n-3N_0)} + \frac{a \{ 1-e^{-K(n-3N_0)} \}}{1-e^{-K}} \quad (5)$$

ここで、 N_0 : 路面清掃間隔、 E : 清掃効率、 K : 路面堆積減衰係数、 P_0 : 先行降雨による残存路面堆積量

4. 路面堆積負荷流出シミュレーション

(1) 路面堆積負荷流出の基礎式

STORMモデルは堆積負荷の連続式は考慮されてなく、負荷流出の運動式のみで取り扱い、流出負荷量は初期堆積負荷量のみによって表わされている。現実には、初期降雨後の流出負荷量は大きく、堆積負荷量が急激に減少しているが、この状態が正しく表わされていない。

流出負荷量が堆積負荷量に敏感に影響するわが国の負荷流出の特性から、これらの問題点を改良した流出負荷の運動式が重要となる。ここでは、このような視点から、路面堆積負荷流出の基礎式を検討し、これによって流出負荷のシミュレーションを行なう。

路面堆積負荷流出の運動方程式、負荷流出の連続式はそれぞれ次のように表わされる。

$$Q_p = C_R \cdot S^{m_R} \cdot R \tag{6}$$

$$S = A \cdot P(n) - \int Q_p dt \tag{7}$$

ここで、 Q_p ：単位時間の路面流出負荷、 C_R ：流出係数、 S ：路面堆積負荷量、 R ：降雨強さ、 A ：路面面積、 $P(n)$ ： n 日後の初期路面堆積量、 m_R ：運動式の係数

(2) 初期堆積負荷およびシミュレーションの条件

1) 初期堆積負荷量

① 土地利用

一般的な土地利用モデルの考え方により、1,000 ha の地域における路面の降雨による流出負荷量を検討する。道路率は23%とする。

② 堆積負荷量

用途地域ごとの堆積含有負荷量原単位は、筆者の調査結果および外国資料をもとにして、次のようにする。

S S：住居地域；1,589 g/m²

商業地域；2,749 g/m²

今回、住居地域と商業地域を取り上げ、その初期堆積負荷量は次のようになる。

住居地域；3,655 t

商業地域；6,323 t

2) シミュレーションの条件

シミュレーションは、 $m_R = 1.0$ の場合について流出係数 C_R が 0.2～0.55 に変化した場合について行なう。対象降雨は、比較的小さな降雨で、次の3降雨である。

- a) 8.5 mm
- b) 22.9 mm
- c) 10.0 mm

さらに、 m_R が変化した場合の流出負荷についても検討した。

流出負荷シミュレーションの諸係数は次のとおりである。

$$0.20 \leq C_R \leq 0.50 \text{ (0.2, 0.25, 0.4, 0.5, 0.55)}$$
$$1.0 \leq m_R \leq 2.0 \text{ (1.0, 1.2, 1.35, 1.5, 1.7, 2.0)}$$

(3) 路面堆積負荷流出シミュレーション結果

1) $m_R = 1.0$ の場合

シミュレーション結果は表-2 (図-1) に示すとおりである。これらから次の特徴が指摘できる。

① 小さな降雨でも初期流

出負荷量は大きく、降雨流出があると堆積負荷の流出が見られる。初期降雨流出以外の流出負荷量は、降雨強度には必ずしも一対一の対応にはならないところも見られる。

表-2 路面流出負荷シミュレーション結果(1)

日 時	降雨量 (mm)	最大降雨強 さ(mm/5分)	最大降雨強 度(mm/hr)	m_R	C_R	S:1/2ま での時間	S:1/3ま での時間	S:1/4ま での時間	ピーク流出 量(t/5分)	NO.
50.11.13	8.47	0.44	2.62	住居 1	0.50	1時間25分	1時間55分	2時間35分	0.39	a-1
				" 1	0.55	1時間10分	1時間50分	2時間15分	0.43	a-2
				商業 1	0.50	1時間20分	1時間55分	2時間35分	0.67	a-3
				" 1	0.55	1時間10分	1時間50分	2時間15分	0.74	a-4
52.8.24	22.94	0.66	4.49	住居 1	0.30	1時間15分	1時間55分	2時間30分	0.33	b-1
				" 1	0.25	1時間30分	2時間10分	2時間55分	0.39	b-2
				商業 1	0.20	1時間55分	2時間20分	3時間40分	0.57	b-3
				" 1	0.25	1時間30分	2時間10分	2時間55分	0.69	b-4
52.11.8	10.00	1.16	4.40	住居 1	0.20	40分	1時間55分	3時間50分	1.05	c-1
				" 1	0.40	30分	35分	40分	1.36	c-2
				商業 1	0.20	40分	1時間50分	3時間50分	1.81	c-3
				" 1	0.40	30分	35分	40分	2.34	c-4

S=7.06t S/2=3.53t S/3=2.35t S/4=1.77t

② 路面堆積負荷量は初期

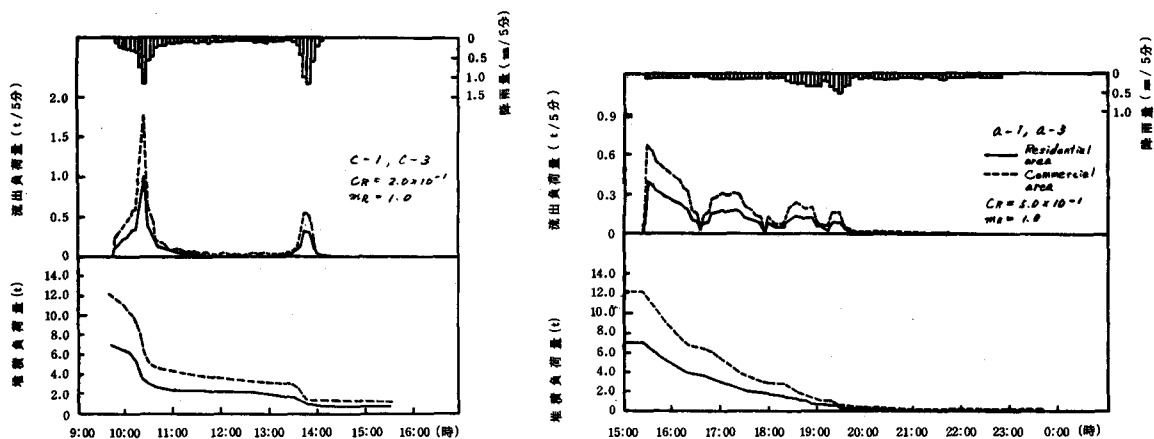


図-1 路面流出負荷シミュレーション (清掃なし)

流出が特に重要であり、初期に強い降雨のある場合には、流出負荷は極めて大きくなり、それ以外の降雨においては、流出の状況は降雨強度にそれほど敏感に影響されない。

2) $m_R = 1.0$ 以外の場合

図-2は、52年8月24日の降雨(22.9mm)について、流出係数を0.25とした場合の m_R が1.2、1.35、1.5、1.7、2.0と変化したときの流出負荷の時間変化と、堆積負荷量の時間変化を示したものである。表-3は初期堆積負荷量が1/2、1/3、1/4となるまでの時間を表わしている。住居地域を対象を絞って検討すると次のような特徴が見られる。

① m_R が増加すると路面流出負荷量は順次大きくなってゆくが、堆積負荷量は時間と共に急激に減少し、降雨初期流出はかなり早くなる。

② 降雨後1時間で初期堆積負荷量の2/3が流出する時のパラメータは、 $m_R = 1.5$ 、 $C_R = 0.25$ であり、この場合には、降雨後35分で堆積負荷の1/2は流出している。

(4) 路面清掃の効果と流出負荷
路面堆積負荷量は、路面のみならず側溝堆積物、雨水マス堆積物等も含めると、その量は決して無視しうるものではない。例えば、中村ら³⁾による東京都谷端川の調査結果によ

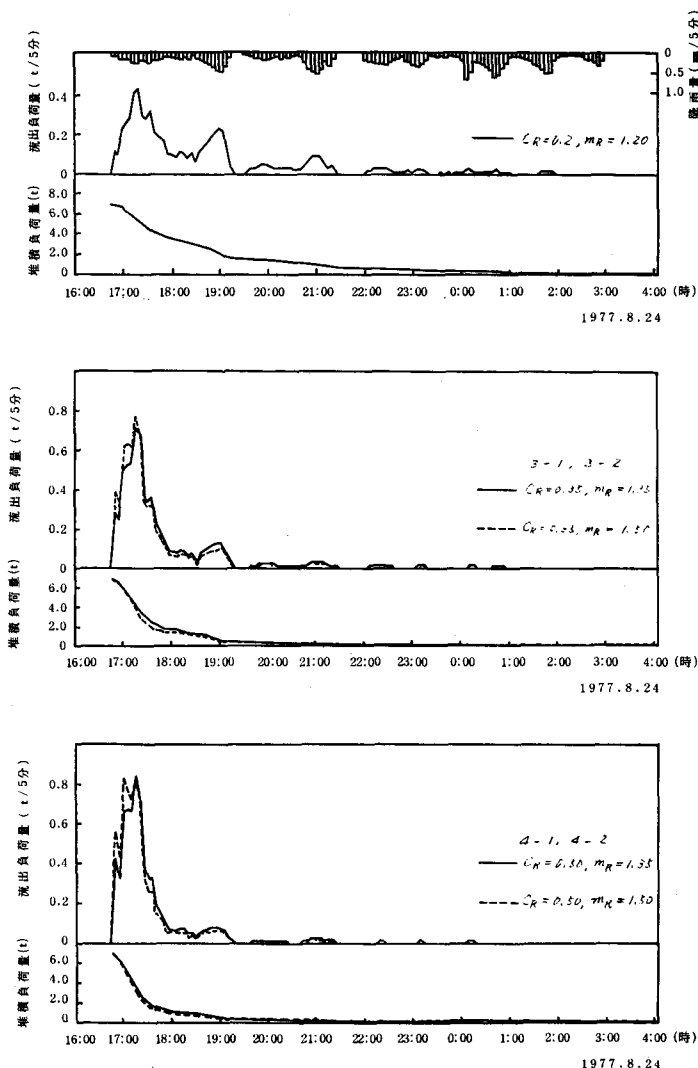


図-2 路面流出負荷シミュレーション (清掃なし)

表-3 路面流出負荷シミュレーション結果(2)

C _R	m _R	Sが1/2までの時間	Sが1/3までの時間	Sが1/4までの時間	ピーク流出量(t/5分)	図の番号No.
0.25	1.20	1時間	1時間55分	2時間15分	0.53	2-1
	1.35	45分	1時間30分	2時間	0.58	2-2
	1.50	35分	1時間	1時間35分	0.62	2-3
	1.70	30分	50分	1時間10分	0.73	2-4
	2.00	25分	35分	50分	0.94	2-5
0.2	1.20	1時間20分	2時間10分	2時間25分	0.43	1
0.35	1.35	40分	1時間	1時間20分	0.71	3-1
	1.50	35分	50分	1時間5分	0.77	3-2
0.50	1.35	30分	45分	55分	0.83	4-1
	1.50	25分	35分	50分	0.84	4-2

$$S=7.06t \quad S/2=3.53t \quad S/3=2.35t \quad S/4=1.77t$$

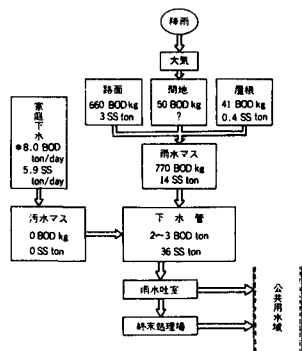


図-3 雨水の流下機構(合流式下水道)からみた負荷堆積量(東京都谷端川流域)
A=5.42 km²

ると(図-3)、側溝、雨水マス堆積物も含めた路面流出負荷は、BODで雨天時に合流式下水道から流出する負荷の33.6~43.2%を占めている。

路面清掃を行なうとどの程度の堆積負荷量となり、降雨時の流出負荷がどのレベルまで低下するのかを、シミュレーションによって検討する。

1) 計算条件

シミュレーション(1)での流出負荷と比較するため、C_R、m_Rはそれぞれ(1)、(2)のものとし、清掃効率を70%、90%、清掃間隔2日、3日とする。シミュレーションのケースは表-4に示す8つである。

2) 路面負荷堆積状況

表-4 路面流出負荷シミュレーション結果(3)

経過日数における路面堆積負荷の状態は図-4(表-5)に示すもので、経過日数と共にほぼ一樣に堆積負荷は増加するが、清掃を行なうと堆積量は急激に減少し、5日後を見ると次の特徴が見られる。

C _R	m _R	清掃間隔	Sが1/2までの時間	Sが1/3までの時間	Sが1/4までの時間	ピーク流出量	清掃効率
0.25	1.35	2日	1時間50分	2時間25分	4時間05分	0.05 t/5分	E=90%
		3日	1時間15分	2時間05分	2時間25分	0.13 t/5分	
0.25	1.35	2	1時間10分	2時間	2時間20分	0.12 t/5分	E=70%
		3	50分	1時間50分	2時間5分	0.23 t/5分	
0.35	1.50	2	1時間15分	2時間10分	3時間05分	0.07 t/5分	E=90%
		3	50分	1時間35分	2時間05分	0.17 t/5分	
0.35	1.50	2	45分	1時間35分	2時間5分	0.15 t/5分	E=70%
		3	35分	1時間	1時間35分	0.30 t/5分	

① 2日間隔で清掃を行なうと除去率70%、90%の場合には、清掃を行なわない場合の1/4、1/7にそれぞれ減少している。

② 3日間隔で清掃を行なうと除去率70%、90%について、それぞれ清掃をしない場合の2/9、3/10に減少する。

いずれの場合も、堆積負荷量を減少させるには清掃が効果的であるといえる。

降雨はランダム事象であるが、降雨前に清掃すると最も効果的であり、降雨の生起事象と合せた清掃間隔の設定も重要となることが指摘できる。

3) 路面負荷流出シミュレーション結果と考察

各ケースごとのシミュレーション結果を図-5に示す。図から次の特徴が指摘できる。

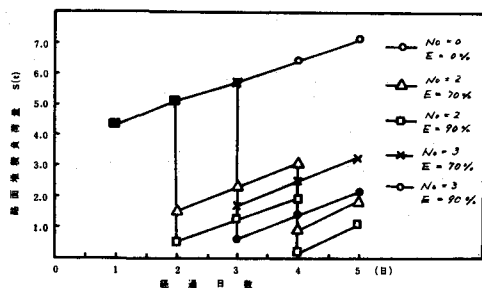


図-4 路面負荷堆積状況

- ① ピーク流出負荷量をみると、除去率90%においては、清掃のない場合より1/5(3日間隔)～1/12(2日間隔)に減少し、全体の流出負荷も小さくなる。

- ② 流出負荷の時間的变化は、堆積負荷量の大きな初期流出が大きく、堆積負荷の減衰が大きい。

- ③ 残存負荷量の減衰は、清掃効率90%において清掃を行わない場合と比較して、清掃間隔3日で1/3～1/4、清掃間隔2日で1/6～1/7程度となり、また降雨時の流出負荷量は清掃を行なった後は小さくなる。

- ④ 清掃間隔を3日から2日にすることにより、ピーク流出量は約1/2～1/3減少するようになり、清掃間隔も効果的である。

以上の事から、初期流出負荷を小さくするためには、初期堆積量を小さくすればよく、路面清掃や側溝、雨水マス堆積物の除去を地域の降雨流出の頻度に合せて比較的合理的に行なうと、その流出負荷量を極力減らす事が可能になる。

表-5 路面堆積量の経日変化

$N_0(\text{日})$	$E(\%)$	1日後のS(t)	2日後のS(t)	3日後のS(t)	4日後のS(t)	5日後のS(t)
0	0	4.35	5.04	5.72	6.40	7.06
2	70	4.35	5.04*	2.29	3.04	1.87
			1.51*		0.91	
	90	4.35	5.04	1.25	1.99	1.01
3	70	4.35	5.04	5.72	2.50	3.24
				1.72		
	90	4.35	5.04	5.72	1.33	3.07

*清掃前後の路面堆積量

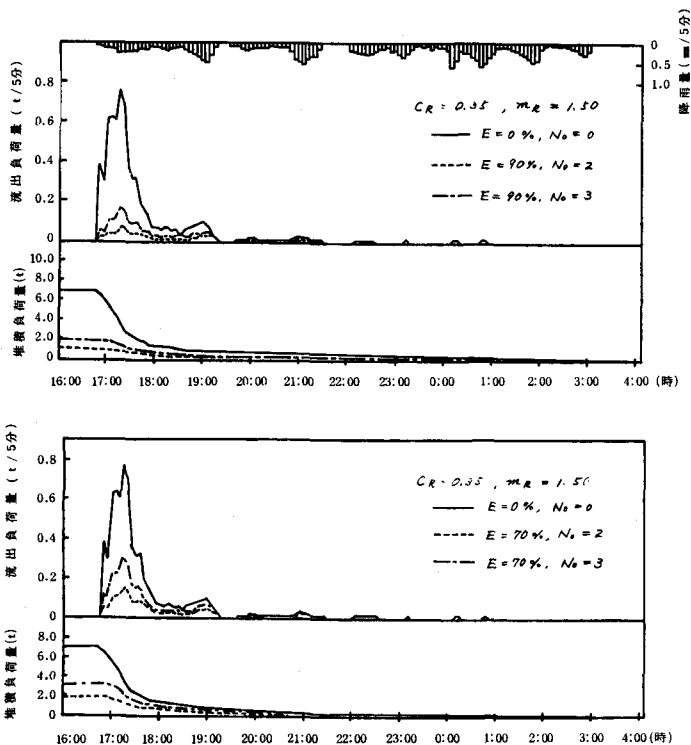


図-5 路面流出負荷シミュレーション(路面清掃考慮)

(5) 流出負荷モデルの運動係数、流出率の検討

流出モデルの運動式の係数、流出係数はここで挙げたシミュレーション結果から検討すると、次の様な評価基準に従って評価しうる。

- 1) 初期流出が降雨開始後1時間前後で終了し、2～3時間後に大半の堆積負荷が減少する。
- 2) Sartorらの流出特性結果と比較する。
- 3) 他の事例と比較する。

以上のような評価基準を用いて、シミュレーション結果から諸係数を検討すると次のような値が妥当となる。

$$\begin{aligned} m_R &= 1.00 & C_R &= 0.2 \sim 0.5 \\ m_R &= 1.20 & C_R &= 0.25 \sim 0.35 \\ m_R &= 1.35 & C_R &= 0.20 \sim 0.35 \end{aligned}$$

ここで、 m_R は路面流出負荷運動式の係数で、 C_R は路面平均流出率である。シミュレーション結果から総合的に判断すると、次のような範囲内に諸係数が存在する。

$$1.00 \leq m_R \leq 1.35$$

$$0.25 \leq C_R \leq 0.50$$

以上の事から、ここに挙げた諸係数を各地域の堆積負荷の状況、流出状況、流出特性を基にして決定することにより、各都市域からの路面流出負荷量をシミュレートし、算定することが可能となる。

本研究に奈良県庁勤務の国沢功氏の協力を付記します。

5. 結 言

STORM等による路面堆積負荷流出モデルについて述べ、流出負荷の考え方および新しく路面清掃も含めた路面堆積負荷算定モデルを示し、その活用方法について説明した。路面堆積負荷量の算定はこの式で容易に求められる。

当モデルにより、初期降雨流出による路面堆積負荷量が適切に表現され、初期堆積負荷の急激な減衰の状態が表われ、小降雨においても流出負荷量は大きくなることが明らかになった。路面堆積負荷量は路面清掃の頻度と効率に大きく影響され、3日間隔で清掃を行なうと、流出負荷量はランダムな降雨において、清掃をしない場合の2/9～3/10に減少することが明らかになった。

また、路面流出シミュレーションを行う場合の路面流出負荷運動式の係数 m_R は1.0～1.35にあり、流出係数 C_R は0.25～0.5にあることも指摘できた。

参 考 文 献

- 1) 和田安彦、田内和三；非点源負荷の定量と水域環境への影響度の評価，第16回衛生工学研究論文集，土木学会，1980年1月
- 2) Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, "STORM", U.S. Army Corps of Engineer, July, 1976, 723-S8-L7520
- 3) 山口高志、中村栄一他；都市域からの雨天時汚濁流出（汚濁源別負荷量調査），第30回年次学術講演会講演概要集(2)土木学会，1975年
- 4) J.D. Sartor, et al; Water Pollution Aspect of Street Surface Contaminants, Journal WPCF, vol. 46, No. 3, March, 1974, pp458～467