

合流式下水道の管渠内汚濁物質堆積地点推定と管渠清掃によるCSO汚濁負荷削減効果の定量化

長岩 明弘¹・攝津 克信²・中島 典之³・古米 弘明⁴

1学生会員 東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻 博士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

2非会員 東京大学 工学部都市工学科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

3正会員 東京大学講師 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1)

4正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

合流式下水道の雨天時越流水 (CSO) 中の汚濁負荷の起源の1つとして、管渠内堆積物がある。管渠内堆積物由来の汚濁負荷を減らす効果的な方法の1つとして、晴天時に下水管を清掃する方法がある。本研究では、分布型モデルを活用し、清掃すべき管渠、すなわち堆積物が多く存在している管渠を特定し、さらに管渠清掃によるCSO汚濁負荷削減を定量的に評価する手法を提案した。

分布型モデル (InfoWorks CS) を使って、まず先行晴天期間の下水の水理挙動をシミュレーションし、汚濁物質の管路内堆積分布を求め、堆積量の多い地点を推定した。続いて、特定の管渠を清掃することを想定し、モデル計算上で管渠内堆積物を除去した後に降雨時のシミュレーションを行い、堆積物を除去しない通常のシミュレーションとの差から特定の管渠の汚濁負荷への寄与を定量化した。さらに遮集量から判断された越流時間帯の各管渠の寄与を計算し、個別管渠の清掃効果を評価した。

Key Words : combined sewer overflow, distributed model, runoff quality model, sewer solids

1. はじめに

近年、お台場へのオイルボールの漂着をきっかけとして、合流式下水道システムから雨天時に汚水の一部が未処理のまま公共用水域に越流する (combined sewer overflow; CSO) ことに伴う汚濁現象への住民の認識が高まり、合流式下水道の改善や雨天時汚濁対策が全国で進められているところである¹⁾。このような合流改善や汚濁対策を効率良く行うためには、雨天時の汚濁負荷量を定量的に把握し、排水区や下水道ネットワーク内の特定箇所へ汚濁対策を行うことが有効である。このため、地表面や管路の分布特性を考慮可能な分布型モデルを活用し、高度に汚濁負荷量を算定することが期待されている²⁾。

これまでも合流式下水道システムに対して分布型モデルを用いた汚濁負荷解析に関する研究^{3,4,5,6)}がいくつか行われ、汚濁負荷流出挙動の再現の試みがなされてきている。本研究では、これらの研究成果を踏まえ、分布型モデルを用いて清掃すべき管渠、すなわち堆積物が多く存在している管渠を特定し、CSO 汚濁負荷削減における個別管渠の清掃効果を定量化する手法を提案する。

本研究の目的は、次の3点である。

- ① 汚水に由来するSSに注目して、その下水道ネットワーク内の堆積分布を解析する。

- ② 管渠内清掃を模擬したモデル計算により、特定管渠由来の管渠内堆積物のネットワーク下流端における寄与を推定する。
- ③ CSO発生時間帯での各管渠由来の堆積物の寄与から、管渠清掃による雨天時越流負荷の削減効果を推定する。

2. 使用した分布型モデルのキャリブレーション

汚濁負荷解析には分布型モデル (Wallingford Software 社 InfoWorksCS Ver.6.5) を用いた。堆積・流出等に関する様々なプロセスサブモデルは文献⁶⁾と同様のものを選択した (表-1)。

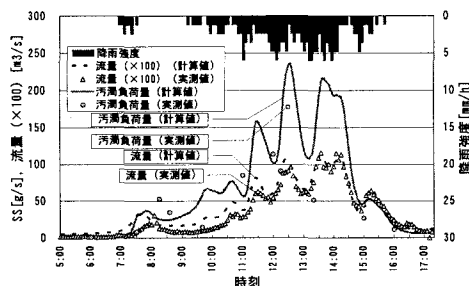
表-1 適用したサブモデルとパラメータ

項目	単位	パラメータ値
地表面堆積モデル (Sartor らの指数関数モデル)	SS 減衰係数	1/day 0.08*
	SS 増加係数	kg/ha/day 13.0*
地表面掃流モデル (Bujon モデル)	SS 浸食係数	C_1 — 100,000,000*
		C_2 — 2.0*
		C_3 — 29.0*
管内堆積・浸食モデル (Ackers-White 式)	SS 粒径 d_{50}	mm 0.04*
	SS 比重	— 1.2
計算時間間隔	秒	30

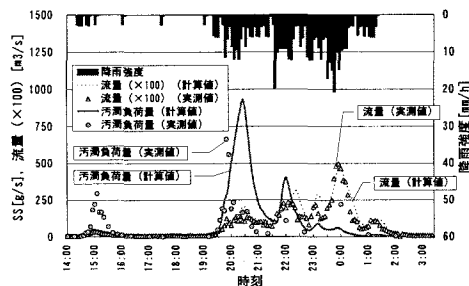
* InfoWorks CS でのデフォルト値

表-2 キャリブレーションのための評価対象降雨とキャリブレーション結果

評価降雨	降雨条件				流量			SS		
	先行晴天期間[h]	降雨継続時間[min]	総降雨量[mm]	最大降雨強度[mm/h]	計測回数[回]	最大量[m ³ /s]	RMS[m ³ /s]	計測回数[回]	最大量[g/s]	RMS[g/s]
<R1>	89	525	18.0	6.0	148	1.16	0.10	12	177.2	34.8
<R2>	96	315	18.1	15.6	114	3.98	0.23	13	1286.7	137.2
<R3>	97	655	46.4	21.4	161	4.97	0.31	40	662.6	237.5
<R4>	8	575	13.0	6.1	145	0.71	0.09	30	106.3	17.2



(a) 評価降雨<R1>



(b) 評価降雨<R3>

図-1 キャリブレーション結果

パラメータのキャリブレーションは、文献 6) と同一の排水区（排水区面積 168.8ha，計画処理人口 14,460 人の合流式下水道）において、表-2 の4つの降雨を対象として行った。

キャリブレーションの結果、表-1 に示すパラメータ値を得た。これらは文献 6) とほぼ同一であるが、SS 比重値のみ既報と異なる。汚濁負荷計算手法の改良に伴いソフトウェアが Ver.6.5 にバージョンアップされ、Ver.5.5 を使用した文献 6) のパラメータのままでは汚濁負荷堆積量が過大となる傾向が認められた。このため、降雨時の実測データに合うように、管内堆積・浸食モデル（Ackers-White 式）の SS 比重値を 1.7 から 1.2 に調整した。

表-2 および図-1 にキャリブレーションの評価対象降雨とキャリブレーション結果を示す。ここで、実測値と計算値の一致の程度は、式(1)で評価した。

$$\text{平均二乗誤差 RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\bar{x}(t) - x(t))^2}{n}} \quad (1)$$

$x(t)$: 実測値, $\bar{x}(t)$: 計算値, t : 時刻

表-2に示したように、キャリブレーションに用いた降雨は、総降雨量も最大降雨強度もさまざまである。このとき流量の平均二乗誤差（RMS）は0.09～0.31 m³/sである。SSでは17.2～237.5 g/sとばらつきはあるが、図-1(a)の小雨や図-1(b)の大雨でもピークのタイミングほぼ合っていることから、本パラメータの設定で雨水流出と汚

濁負荷流出現象をおおよそ再現することができたと判断した。

3. 管渠内の汚濁物質解析方法

(1) 対象排水区と降雨の条件

a) 対象排水区

管渠ごとの詳細な汚濁負荷解析を行う対象排水区には、キャリブレーションに用いた排水区の一部である、総面積60.33ha，計画処理人口6,107人の部分排水区を用いた。この排水区内には、マンホールが359箇所、管渠が361本ある（図-5参照）。本解析においては、この部分排水区の最下流端での流量、汚濁負荷量を計算した。また、仮想的に最下流端に吐き口があるとして、越流量を計算した。

b) 降雨条件

汚濁負荷解析に用いる先行晴天期間は、対象排水区の2000年の連続晴天日数のデータ（図-2）をもとに、3日とした。具体的には、先行晴天期間の管渠内の現象を模擬するために、図-3に示す流量とSS濃度の汚水を午前0時から3日間（＝72時間）を流す条件の計算を行った。さらに3日目の午前0時から2時までの2時間を、管渠清掃などの対策を取るための予備的な晴天期間とし午前2時を仮定降雨開始時間とした。これは、午前2時から午前6時までは汚水の影響が少なく、降雨に起因する汚濁負荷流出を確認しやすいためである。

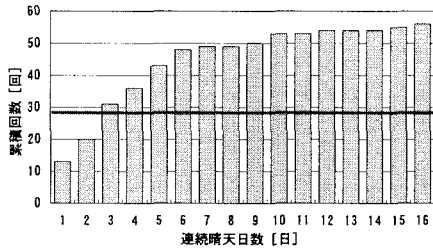
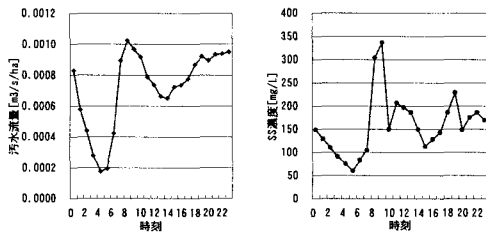


図-2 対象排水区連続晴天日数累積頻度分布
(2000年、合計56降雨、横線は50%)



60.33ha のとき、汚水流量：3736.7 m³/day、
最大汚水流量：0.061m³/s (216.2 m³/h)
平均濃度：158.9mg/L
図-3 計算に用いた汚水の流量と SS 濃度の日間変動パターン

表-3 降雨のデータ

	降雨総量 [mm]	最大降雨 強度 [mm/h]	降雨時間 [h]
解析データの平均	10.6	3.7	9.3
仮想降雨1	10.0	1.0	10.0
仮想降雨2	10.0	3.5	5.0
仮想降雨3	10.0	6.0	3.0

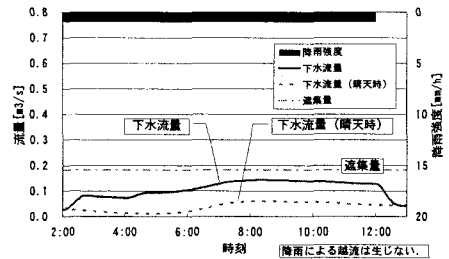
表-4 分布型モデルにおける管渠清掃の表現方法

方法	対象管渠の位置	モデル上の表現方法
〈1〉	対象管渠が下水道ネットワークの最上流端、あるいは上流端に近い位置にある場合 (図-5 の 1110, 1159, 1290, 1194 など)	先行晴天期間中の SS 濃度を、対象管渠とその上流のみ 0 として与え、SS が堆積しないようにする。
〈2〉	対象管渠がネットワークの中央部分にある場合 (図-5 の 1148)	先行晴天期間終了後に対象管渠上流端から SS 濃度 0mg/L の洗浄水を 1m³/s で 1 時間流して、堆積している汚濁物を除去する。

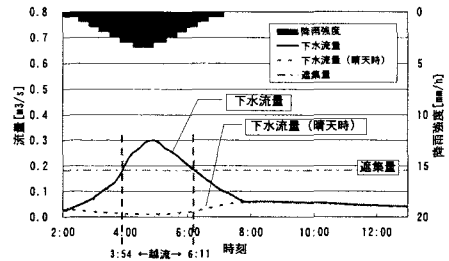
仮想降雨は、2000年の対象排水区の降雨パターンの解析から、表-3に示す3つの降雨条件とした。これらの仮想降雨を与えた際の対象排水区最下流端での下水流量の変化を図-4に示す。ここで、遮集量は時間最大汚水量の3倍とした。仮想降雨1では、最下流端での下水流量が常に遮集量以下であり、越流は生じないことになる。一方、仮想降雨2と3では、最下流端での下水流量が遮集量を上回る時間帯があり、越流が生じる条件となっている。

(3) 管渠清掃のモデル計算における表現方法

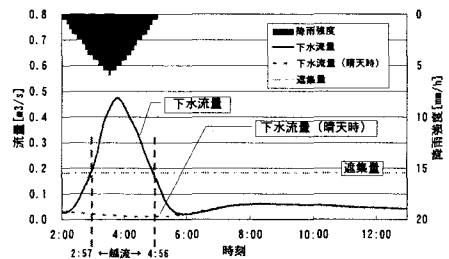
管渠の清掃は、先行晴天期間終了後に清掃対象管渠の



(a) 仮想降雨 1



(b) 仮想降雨 2



(c) 仮想降雨 3

図-4 仮想降雨条件下での対象排水区最下流端の
下水流量の時間変化

SS堆積量を0に設定し直せば、模擬することができる。しかし本研究で使用するソフトウェアでは、このような管渠内堆積量の自由な設定ができない。このため表-4に示す2つの手法を考案した。なお、表-4に示したとおり、〈1〉の方法においては、清掃対象の管渠が下水道ネットワークの上流端に近いが最上流端ではない場合には、対象管渠の上流に位置する管渠全てを同時に清掃すること同等の操作をすることになる。

(4) 最下流端でのSS負荷量への各管渠の寄与の定量方法

最下流端での SS 負荷量への各管渠の寄与の定量方法は次のとおりである。まず前節に示した手法により特定の管渠に堆積している SS を取り除き、仮想降雨条件下での流出のシミュレーションを行った。次に清掃した場

表-5 降雨開始時点の管内SS堆積量と仮想降雨後の残存堆積量の計算結果

管渠番号	降雨開始 時堆積量 [kg]	全体合計 に対する 割合[%]	仮想降雨1				仮想降雨2				仮想降雨3				管渠径 [mm]	管渠長さ [m]	備考
			降雨終了 時堆積量 [kg]	全体合計 に対する 割合[%]	減少量 [kg]	減少率 [%]	降雨終了 時堆積量 [kg]	全体合計 に対する 割合[%]	減少量 [kg]	減少率 [%]	降雨終了 時堆積量 [kg]	全体合計 に対する 割合[%]	減少量 [kg]	減少率 [%]			
1148	48.15	28.85	33.59	37.54	14.56	30.2	15.79	34.84	32.36	20.57	44.46	27.58	3.69	7.6	1000	57	[A], 下流管渠の管底高が高い
1110	13.90	8.33	12.28	13.72	1.62	12.1	5.43	11.98	8.47	4.21	9.10	9.69	4.80	35.3	400	42	[B], 逆勾配
1159	10.46	6.27	8.95	10.00	1.51	14.4	4.12	9.09	6.34	4.85	10.48	5.61	6.12	58.1	600	42	[B], 逆勾配
1290	7.82	4.69	0.06	0.07	7.76	99.2	0.04	0.09	7.78	0.00	0.00	7.82	0.00	0.0	500	81	[A], 下流管渠1289で管底高が高い
1194	5.17	3.10	0.02	0.02	5.15	99.6	0.02	0.04	5.15	1.01	2.18	4.16	80.2	81.1	450	40	—
1165	2.99	1.79	0.01	0.01	2.98	99.7	0.01	0.02	2.98	0.27	0.58	2.72	91.3	91.0	300	42	—
1172	2.81	1.68	0.01	0.01	2.80	99.7	0.01	0.02	2.80	0.00	0.00	2.81	0.00	0.0	400	30	—
1354	2.74	1.64	0.01	0.01	2.73	99.7	0.01	0.02	2.73	0.13	0.28	2.61	95.3	95.3	300	38	—
1007	2.33	1.40	0.01	0.01	2.32	99.6	0.01	0.02	2.32	0.00	0.00	2.33	0.00	0.0	350	28	—
1014	2.09	1.25	0.01	0.01	2.08	99.5	0.01	0.02	2.08	0.00	0.00	2.09	0.00	0.0	300	46	—
10管渠合計	98.46	59.00	54.95	61.41	43.51	44.3	25.45	56.16	73.01	31.04	67.08	67.42	68.44	55.8			
他の管渠の合計	68.43	41.00	34.53	38.59	33.90	49.8	19.87	43.84	48.56	15.23	32.92	53.20	68.43	55.8			
全体合計	166.89	—	89.48	—	77.41	46.4	45.32	—	121.57	46.27	—	120.62	73.87	55.8			

(注) ここでは管渠361本中、降雨開始時堆積量の上位10本のみを示す。ここで、降雨終了時とは、降雨終了後2時間を意味する。

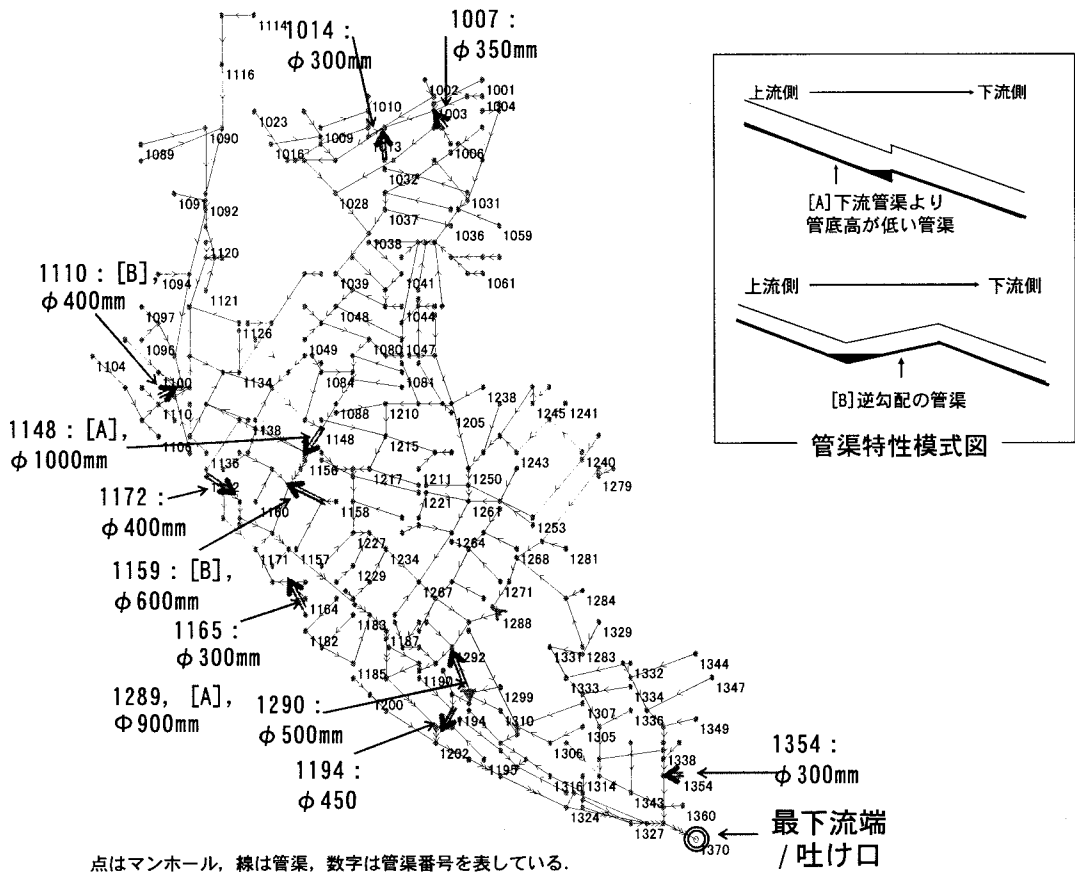


図-5 解析対象管渠ネットワークとSS堆積量が多いと計算された管渠の位置と管渠特性模式図

合と清掃しない場合との最下流端でのSS負荷量の差を求めた。この差を当該管渠の堆積物の寄与量とみなした。

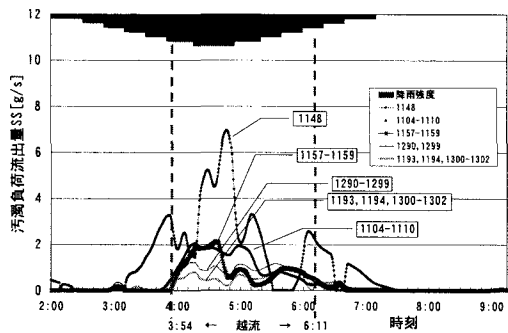
(5) 清掃による削減効果の評価方法

特定管渠を清掃して、図-4に示した越流時間帯のSS越流量を求めた。清掃の有無による越流量の差を、当該管渠清掃によるCSO汚濁負荷削減量とみなした。

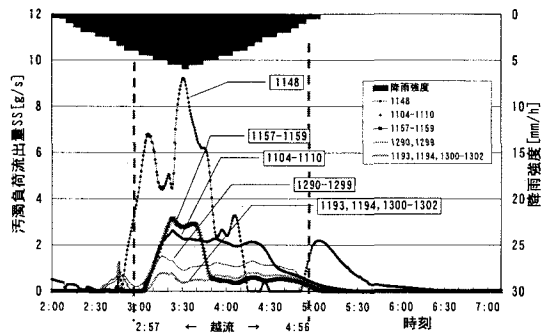
4. 結果と考察

(1) 汚濁負荷堆積地点の特定

表-5に降雨開始時点の管内SS堆積量と、各仮想降雨後の残存堆積量を示す。また図-5に対象排水区の下水管ネットワークと堆積量が多い管渠の位置と、堆積しやすい管渠の特性模式図を示す。



(a) 仮想降雨2



(b) 仮想降雨3

図-6 最下流端での各管渠堆積物由来の汚濁負荷量の変化

対象排水区全体では、降雨前に 166.89kg の汚濁物質が堆積し、最も多い管渠（管渠番号 1148）ではネットワーク全体の 28.85%が堆積している。また上位 10 管渠で全体のおよそ 60%，上位 5 本で 50%を占める。特に堆積が多い地点は、図-5 の模式図に示すような、下流管渠より管底高が低い管渠や、逆勾配の管渠、およびその周辺の管渠であった。この中でも管渠 1148 は、管渠径も大きく、長さも比較的に長いために、堆積量が多くなったと考えられる。

また表-5から、ネットワーク全体の管渠内堆積量は、各仮想降雨1, 2, 3によって89.48 kg, 45.32 kg, 46.27kgに減少している。降雨強度が大きい仮想降雨2, 3での減少量が多くなっている。

降雨後の堆積量分布を見ると、いずれの仮想降雨の場合でも管渠1148, 1110, 1159の3本に多く残っている。降雨によってネットワーク全体の堆積量が減少し、堆積しやすい箇所に局在化するという計算結果となった。

(2) SS負荷の寄与管渠の特定

表-5 で挙げた 10 カ所の管渠を対象に、管渠清掃のモデル計算を行った。手法の節でも述べたように、管渠 1194 のように対象管渠が最上流末端にない場合は、その上流に位置する 1193 や、1300 から 1302 までの管渠に対しても清掃を施した（1193, 1194, 1300-1302 と表記した）。図-6 は下水道ネットワーク中の各管渠に堆積した SS が、雨天時に最下流端にどれだけ流出してくるかを、上位 5 カ所について示した図である。(a), (b) ともに越流が生じる時間帯での流出が多くなっている。また、堆積量が多い 1148 が、流出も最も多い。

ここで管渠1148内堆積物由来のSS負荷量が他より大きく変動しているのは、モデルの表現方法によるものと考えられる。管内堆積・浸食モデルで適用した Ackers-White式では、管渠内の汚濁物質濃度が、設定さ

表-6 汚濁負荷越流量の計算結果

管渠 清掃	管渠番号	SS越流量 [kg]	削減 効果[%]	SS越流量 [kg]	削減 効果[%]
なし	—	28.9	—	51.2	—
あり	1148	22.4	22	39.7	22
	1104-1110	25.7	11	45.0	12
	1157-1159	26.5	8	47.0	8
	1290-1299	26.8	7	47.7	7
	1193, 1194, 1300-1302	27.7	4	49.3	4
	1165	28.2	3	50.0	2
	1172, 1174	27.7	4	49.1	4
	1354	28.4	2	50.3	2
	1006, 1107	27.9	4	49.2	4
	1014	28.3	2	50.0	2
	10管渠の合計	—	68	—	67

れた堆積・浸食の限界濃度より高くなると堆積状態になり、低くなると巻き上げ状態になる。管渠1148では、汚濁負荷濃度が限界濃度より高くなったり低くなったりすることで堆積と巻き上げが交互に発生し、SS濃度が変動しているものと考えられる。特に管渠1148はネットワークの中間に位置するため、他の清掃対象管渠よりも上流管渠の影響を受けやすく、この現象が起りやすくなっていると考えられる。

(3) 清掃によるCSO汚濁負荷削減効果

表-6は、吐口におけるSS越流量を示している。管渠清掃をしない場合に、例えば仮想降雨3では51.2kgあったSS越流量は、管渠1148のみを降雨直前に清掃することにより39.7kgにまで減少することが示された。この削減量は清掃をしない場合の越流汚濁負荷の22%を占めており、このような特異的な管渠を見つけ出すことが、効率的な管渠清掃において重要である。また、異なる降雨パターンである仮想降雨2, 3においてそれぞれの管渠の越流汚濁負荷への寄与に大きな差がないことも表-6から読み取れる。一般化した結論は導き出すためには、他の降雨パターン、他の管路ネットワークでの検討が必要

であるが、このように越流への寄与を定量的に示す手法は、効率的なCSO対策に大きな貢献ができるものと期待できる。

5. まとめ

本研究では、分布型モデルを用いて、合流式下水道における管渠内汚濁物質堆積地点を推定し、管渠清掃のCSO汚濁負荷削減効果を定量化する手法を提示し、その具体的な計算例を、既存研究のある排水区を対象に示した。

- ①下流管渠より管底高が低い管渠や、逆勾配の管渠など一部の管渠へのSS堆積量が顕著であることが示された。さらに降雨によって堆積物が流出した後も、これらの管渠に、多く残存することが示された。
- ②個別の管渠の清掃を模擬した計算モデルを示し、その計算により、個別管渠の越流汚濁負荷への寄与と管渠清掃の効果を定量化した。その結果、特異的にSSが堆積している管渠（管渠番号1148）を清掃することで越流汚濁負荷を22%削減できることが示された。

参考文献

1. 国土交通省都市・地域整備局下水道部、財) 下水道新技術推進機構：合流式下水道の改善対策に関する調査報告書、2003。
2. 古米弘明：都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題、水環境学会誌、Vol.25, No.9, pp.524-528, 2002。
3. 渡邊政広、永吉光一、岡田将人：合流式下水道流域における雨天時汚濁負荷流出の分布型非定常解析モデル、環境工学研究論文集、第35巻、pp.73-84、1998。
4. 古米弘明、脇岡靖明、市川新：分布型モデルを用いた浸水対策用雨水貯留幹線を有する合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷解析、下水道協会誌 Vol.38, No.467, pp.99-111, 2001。
5. 脇岡靖明、古米弘明、市川新：下水道台帳データと細密数値情報を利用した分布型モデルによる大都市下水道排水区の流出解析、下水道協会誌、Vol.38, No.469, pp.79-90, 2001。
6. 糸井・古米・中島：合流式下水道雨天時汚濁解析のための管路内堆積物局在状況の推定手法、環境システム研究論文集、Vol.32, pp.183-190, 2004。

IDENTIFICATION OF SEWER PIPES TO BE CLEANED FOR REDUCATION OF CSO POLLUTANT LOAD

Akihiro NAGAIWA, Katsushi SETTSU, Fumiyuki NAKAJIMA and Hiroaki FURUMAI

To reduce the CSO pollutant discharge, one of the effective options is cleaning of sewer pipes in dry weather period. To maximize the cleaning efficiency, identification of pipe to be cleaned is necessary. In this study, we estimated the location of pipe-deposit in dry weather in a combined sewer system using a distributed model (InfoWorks CS) and evaluated the effect of pipe cleaning to reduce the pollutant load from combined sewer overflow (CSO).

First we simulated the dry weather flow in a combined sewer system. The pipe deposit distribution in the network was estimated after 3 days of dry weather flow. In order to evaluate the effect of countermeasures for CSO problems, we conducted several simulations assuming pipe cleaning in dry weather period. In this simulation, pipe cleaning was described as 1) SS-free sewage inflow for the upstream pipes, or 2) excess water input to a manhole for middle- or downstream pipes. The SS loads at the end of the sewer network with or without the pipe cleaning was compared. According to the pipe cleaning simulation method with a consideration of CSO timing, the effectiveness of pipe cleaning was quantitatively evaluated. From the example shown in this study, the pipe sediments in a few pipes significantly contributed to the pollutant load at the network end and the cleaning of a specific pipe reduced 22% of total CSO load.