

合流式下水道越流水の長期観測に基づく汚濁負荷解析と対策の検証

廃棄物・有害物管理工学研究室 草場大作
指導教員 姫野修司 小松俊哉

1. 背景と目的

合流式下水道は、雨天時に大量の雨水と共に汚水が未処理のまま公共水域に放流される合流式下水道越流水（Combined Sewer Overflow：CSO）が全国的に問題¹⁾となり、放流先水域の公衆衛生、生態系、景観への影響が懸念されている。公共水域の水環境を保全するためには、長期的な CSO 放流実態や汚濁負荷の流出特性を正確に把握し、高い再現性を有した流出解析モデルを適用して効果的な汚濁負荷削減対策の提起が求められる。

そこで、本研究はこれまで CSO の長期モニタリングシステムを構築し、連続降雨を対象に約 43 ヶ月間 CSO モニタリング調査を行い、雨水流出特性や流出状況の実態把握を行った。また、これら長期の実測データから、CSO 汚濁負荷の流出による影響を定量的に評価・検証していくために分布型流出解析モデルを適用し、より信頼性や妥当性を有するモデルの構築、及び汚濁負荷に影響する因子の同定について検討した。更に、構築したモデルから水質欠損降雨の汚濁負荷解析を行い、高精度な CSO 年間汚濁負荷量と原単位を導出し、対策シミュレーションから効果的な汚濁負荷抑制に資する貯留規模を推算することとした。

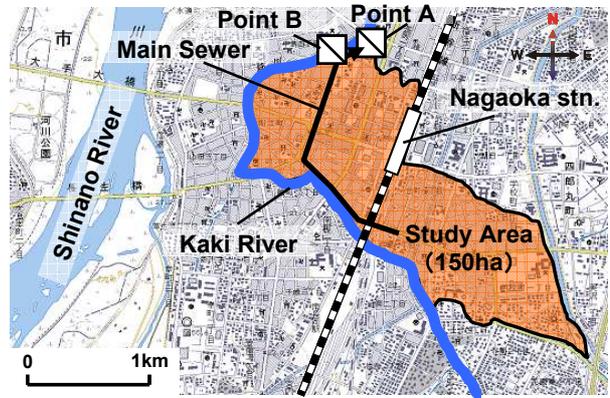


Fig.1 Experimental Area

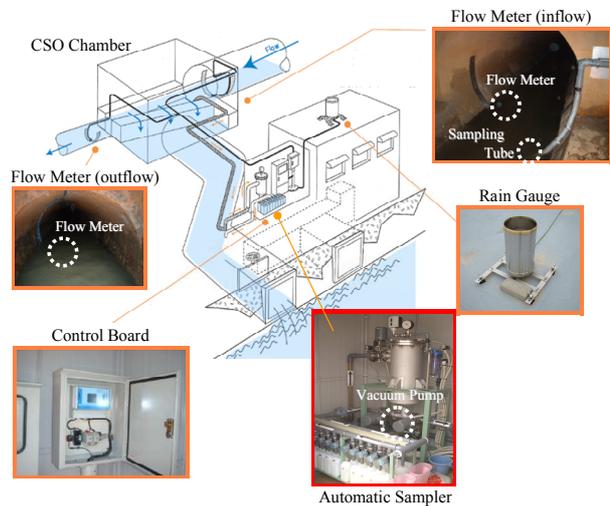


Fig.2 CSO Monitoring System (Point A)

2. CSO の長期モニタリング調査

2. 1 対象区域の概要

研究対象区域は、Fig.1 に示すように長岡市公共下水道合流区域 676ha のうち駅前の商店街や郊外の住宅街を含んだ約 150ha とした。対象区域内には、1 級河川信濃川の支流である柿川へ CSO を放流する吐き口が 2 箇所存在する。

2. 2 モニタリングシステムの概要

2004年に下水道幹線の最下流に位置する吐き口 Point A に Fig.2 に示すような観測システムを構築し、雨量、流量、CSO 水質（SS 及び BOD）の長期的なモニタリングを実施している。また、新たに Point A の上流部に位置する Point B においても CSO 流出が確認されたため、2007 年より流量の観測を開始した。

Table 1 Autosampler sampling intervals

			~1hour	~2hour	2hour~
Dry weather survey	Interval	(min)		60	
	Data point	(-)		24	
Wet weather survey	Interval	(min)	5	10	60
	Data point	(-)	12	6	2~

2. 3 モニタリングシステムの概要

CSO の水質挙動を正確に把握するためには、降雨初期の短時間で水質が急激に変化するファーストフラッシュ現象や断続的に生じる CSO を捉える必要がある。そこで、Table 1 に示すように CSO 開始直後のサンプリング間隔をより密にし、水質挙動を把握できるように設定した。また、長時間降雨においても継続してサンプリングが可能な設定をした。採水したサンプルは、下水試験方法に則って、SS 及び BOD の測定を行った。

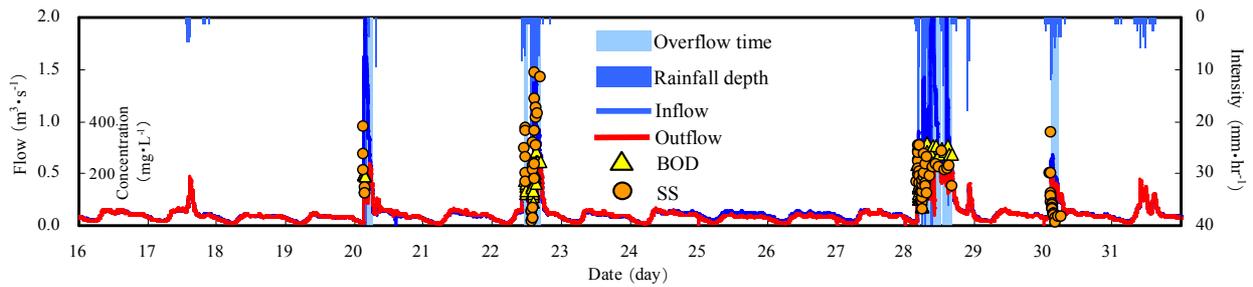


Fig.3 A part of Long-term Observation (Point A) : CSOs and Precipitation (16-31 August 2007)

3. 調査結果と考察

3. 1 流出実態

長期連続モニタリング結果(ハイドログラフ, ハイエットグラフ, 水質測定結果)の一部を Fig.3 に示す。CSO 発生時には, 上流側流量と下流側流量に差が生じることで, CSO 流出の確認ができ, 確実にファーストフラッシュから CSO 水質を捕捉することに成功している。Fig.4 には, 2004 年からの無降雪期間における CSO 流出回数と流出水量の推移を示す。流出回数は, 過去 4 年で最大 53 回の差がみられた。2004 年の CSO 流出量は, 流出回数が最も多かった 2006 年より上回る結果となり, 降雨量や強度, 継続時間といった降雨特性の影響を大きく受けることがわかった。

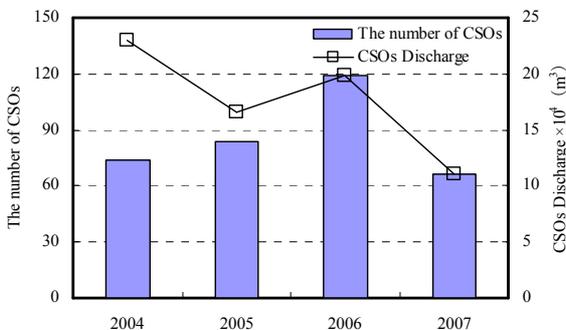


Fig.4 Change in the number of CSO and CSO Discharge.

3. 2 汚濁負荷流出特性

汚濁負荷の流出特性を把握するため, 流出量との関係性について検証した結果, 流量に対する負荷量の履歴曲線は, Fig.5 に示すように時計回りのループを描くことがわかった。これは, 流量が同じでも, 降雨初期に流出する汚濁負荷の方が, 降雨の後半の流出による汚濁負荷量よりも大きく, 濃度も高いことを表わしている。また, BOD よりも直線的なループを示す SS は,

雨水流出後半でも負荷量が減少しないため, 管路内付着物の SS 汚濁負荷だけでなく, 断続的な地表面等の堆積物流出も汚濁源であることが言える。したがって, CSO の汚濁負荷量を把握するためには, 路面等の管路施設外からの負荷の流出現象も考慮する必要があると考えられる。

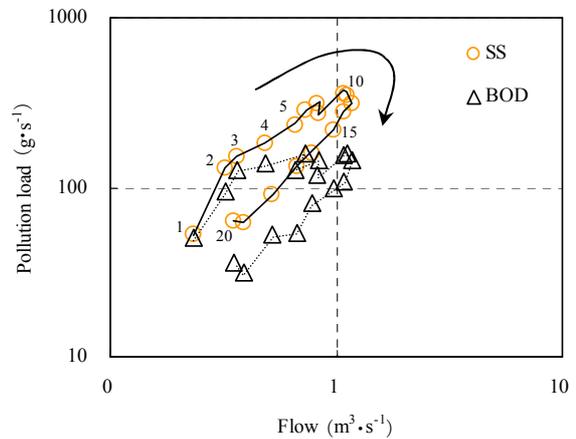


Fig.5 Relationship between flow and SS and BOD pollution load.

4. 流出解析モデルの適用

モニタリング調査では, 全降雨で水質を測定するのは困難である。水質欠損区間を予測するための流出解析モデルによる汚濁負荷解析は, 汚濁負荷の流出挙動を再現し, 現実に即した対策シミュレーションを行う上で有効なツールである。よって本研究では, 流出解析モデル(MOUSE)を適用して実測データと高い再現性を有したモデルを構築し, 汚濁負荷シミュレーションにより欠損区間を予測, 実測と補完することとした。これにより, 長期連続モニタリングに基づいた年間汚濁負荷量の推算, 汚濁負荷原単位の導出が可能となる。また, 下水道システムからの汚濁負荷流出を抑制するため, 貯留施設をモデル化し, 効果的な対策を検証した。

4. 1 適合性の検討

4. 1. 1 流量キャリブレーション(2地点同時解析)

解析モデルを構築するため、Table 2 に示すような先行晴天期間、総降雨量、降雨継続時間、最大降雨強度に特徴を持ち、モデルを検証するのに適していると考えられた降雨について2地点同時キャリブレーションを行った。雨水流出パラメータとして、実測結果から流出率 0.45、流達時間 5min、初期損失 0mm を設定し、解析を行った。その際、解析結果の適合性評価手法として合致率と適合度²⁾を用いた。合致率の算定式を式(1)に、適合度を式(2)に示す。

Table.2 Characteristics of using calculated rainfall events

No.	Date	Dry weather period (day)	Rainfall		Maximum intensity (mm·hr ⁻¹)
			Amount (mm)	Duration (min)	
①	2006.5.11	3.0	12.7	616	7.2
②	2006.5.28	0.3	13.1	785	19.2
③	2006.6.15-16	1.0	11.6	773	7.2
④	2006.6.27	4.1	11.6	433	27.6
⑤	2006.6.30-7.1	3.4	119	2891	51.6
⑥	2006.7.21	1.8	12.1	340	18.0
⑦	2006.8.1	3.5	22.5	265	21.6
⑧	2007.5.25	5.2	14.5	321	12.0
⑨	2007.7.2	1.1	24.4	535	10.8
⑩	2007.7.25-26	4.4	80.6	1053	69.6
⑪	2007.8.22	2.1	38.9	595	36.0

$$E_Q = \left\{ 1 - \sqrt{\sum (Q_{sm} - Q_s)^2 \div TQ_{sm}} \right\} \times 100 \quad (1)$$

$$TD_Q = TQ_s / TQ_{sm} \quad (2)$$

ここで、 E_Q : 流量の合致率(%), Q_{sm} : 実測流量, Q_s : 解析流量, TQ_{sm} : 実測総流量, TD_Q : 流量の適合度, TQ_s : 解析総流量である。

解析を行った対象降雨全ての合致率と適合度を Table 2 に示す。平均で 97% 以上の合致率が得られた。解析結果の一例として、⑨を Fig.6 に示す。実測総流量に対する解析総流量の割合

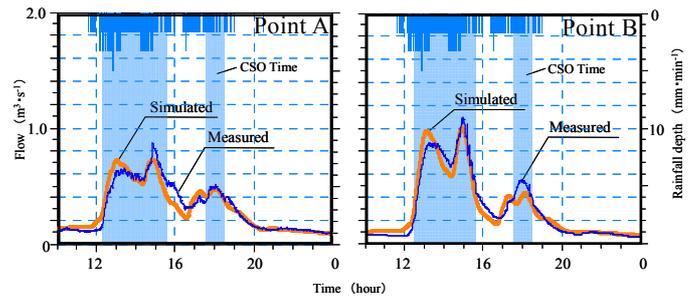


Fig.6 Results of the flow calibration with MOUSE (⑨).

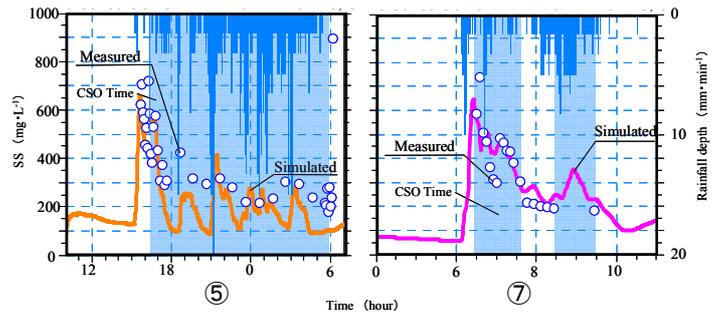


Fig.7 Results of the pollution load analysis with MOUSE (SS).

を表す適合度も Point A, B で共に比較的高い値が得られ、高い再現性を有するモデルが構築出来たといえる。

4. 1. 2 汚濁負荷影響因子の最適化

MOUSE では、地表面堆積・流出及び管渠(雨水柵)内堆積・流出の2つの流出過程で汚濁負荷解析が行われる³⁾。そこで、これら汚濁負荷影響因子の最適化を図った。Fig.7 に汚濁負荷解析結果の一例を示す。また、Table 3 に各降雨の解析結果を示す。各降雨において流出負荷に大きく影響する降雨初期のファーストフラッシュ時で概ね実測と最適化が図れた。また、汚濁負荷量の合致率は平均で 90% 程度と高い値が得

Table 3 Results of concordance rate and goodness of fit.

No.	Date	Point A						Point B	
		Discharge		Pollution load				Discharge	
		Concordance (%)	Goodness (-)						
①	2006.5.11	99.1	0.99	90.6	1.21	93.0	1.11		
②	2006.5.28	98.5	0.90	93.0	0.90	90.7	1.16		
③	2006.6.15-16	99.0	0.96	88.4	0.80	80.5	1.60		
④	2006.6.27	94.9	1.28	96.0	1.02	94.5	0.91	No data	
⑤	2006.6.30-7.1	98.6	0.71	88.5	0.65	85.0	0.70		
⑥	2006.7.21	95.0	1.39	94.3	1.05	89.3	0.92		
⑦	2006.8.1	98.6	0.89	92.5	1.12	92.6	0.80		
⑧	2007.5.25	98.1	1.15	90.0	1.24	71.8	1.91	97.4	0.90
⑨	2007.7.2	99.0	0.99	88.1	1.26	86.5	1.05	98.8	0.97
⑩	2007.7.25-26	98.5	0.74	-	-	-	-	96.9	0.64
⑪	2007.8.22	98.1	0.88	79.8	1.58	88.2	1.27	98.4	1.10
Average		97.9	0.99±0.21	90.1	1.08±0.26	87.2	1.14±0.37	97.9	0.90±0.19

られた。この決定パラメータを **Table 4** に示す。パラメータは降雨特性によって3つのタイプに分類された。Type A の CSO は、数時間かつ単発的に河川へ流出し、降雨初期から一般的な浸透域の浸透能 $10\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ 以上の強度を示す特徴を有している。Type B の CSO は、河川への流出時間が数時間程度であるが断続的に流出し、降雨は数十分から数時間後に複数回発生する特徴を有している。また、Type C の CSO は、河川への流出時間が数時間から数十時間、場合によっては断続的に流出し、降雨は連続的かつ断続的で長時間に及ぶ特徴を有している。

これらの結果から、これまで課題とされてきたモニタリングデータの体系だった蓄積とその実測データに基づいた流出解析モデルを構築でき、高い整合性を有する汚濁解析による合流改善政策案への反映が可能となった。しかし、長時間続く降雨や、比較的強度が高い降雨⑤, ⑩, ⑪においては、合致率、適合度共に精度が低くなった。これは、路面流出に加え、降雨継続と強度の増大による浸透域などからの汚濁流出が不明確要因として加わるものと推察された。

Table 4 Analysis Condition

Parameter	TypeA (N=4)	TypeB (N=4)	TypeC (N=2)	
Surface sediment build up rate	900 (400-2000)	370 (83-1000)	9963 (9925-10000)	
Detachment rate	0.001	0.001	0.0001	
Dry Weather Period	-	-	-	
Gully pot build up rate	SS (mg·L ⁻¹ ·day ⁻¹)	1500 (400-4500)	1225 (500-1900)	750 (700-800)
	BOD (mg·L ⁻¹ ·day ⁻¹)	1200 (250-3800)	413 (350-500)	750 (500-1000)

4. 2 年間汚濁負荷量と原単位の導出

構築された再現性の高いモデルを用いて、水質欠損期間の汚濁負荷シミュレーションを行い CSO の年間汚濁負荷量と汚濁負荷原単位の推定を行った。CSO 年間汚濁負荷量は、式(3)で求められる。

$$L_{total} = L_{measured} + L_{loss} \quad (3)$$

ここで、 L_{total} : CSO 年間汚濁負荷量(kg), $L_{measured}$: 実測負荷量(kg), L_{loss} : 水質欠損降雨の汚濁負荷量(kg)である。

本研究では、過去4年のモニタリングにおいて最も流出負荷の大きかった2006年を対象に

Table 5 Results of yearly pollution load.

	Pollution Load			Yearly CSO Pollution Load	
	Measured	Simulated	Σ		
	($\times 10^3$ kg)	($\times 10^3$ kg)	($\times 10^3$ kg)	($\times 10^3$ kg·km ² ·year ⁻¹)	
SS	No Snow	50.3	29.0	79.3	61.9
	Snow		7.4	7.4	5.8
	yearly	50.3	36.4	86.7	67.7
BOD	No Snow	27.0	16.3	43.3	33.8
	Snow		8.1	8.1	6.3
	yearly	27.0	24.4	51.4	40.1

年間汚濁負荷量を推定し、対象区域面積を考慮した汚濁負荷原単位を導出した。**Table 5** に汚濁負荷量の解析結果を示す。ここでの実測結果は、水質測定を行った25降雨(CSO流出回数61回)から算出した結果である。また、無降雪期間(4~11月)における解析値は、水質欠損の29降雨について汚濁負荷シミュレーションを行った結果である。降雪期間(12~3月)は、降雪時のモニタリング結果(N=130)からCSO水質が概ね一定であったことから、CSO流出量と一定水質(SS=38.7mg·L⁻¹, BOD=43.7mg·L⁻¹)の積で算出した。結果的に、2006年は、年間SSで86.7×10⁴kg, BODで51.4×10⁴kgの汚濁負荷量が公共用水域へ流出していることが明らかとなった。また、SS汚濁負荷原単位は67.7×10³kg·km⁻²·year⁻¹, BOD汚濁負荷原単位は40.1×10³kg·km⁻²·year⁻¹となることが明らかとなった。和田⁴⁾は、商業地域からの路面堆積負荷量がSSで1.0×10³kg·km⁻²·year⁻¹, BODで0.05×10³kg·km⁻²·year⁻¹と報告している。これらと比較してCSO汚濁負荷は、SSで60倍以上、BODで600倍以上となった。また、路面排水は、流出した降雨全量から算出された値であるのに対して、CSO汚濁負荷は様々な損失を受けた降雨水量が下水道システム内に流入し、更に河川へ流出するその一部の流出量から算出した値である。以上を勘案すると、CSOは短時間かつ少規模な流出量であるが、非常に高負荷の汚濁水が公共水域へ流出していることが推察される。

これまでの結果から、CSO流出負荷量を予測するためにCSO流出量と流出負荷量の関係を検証した。**Fig.8**に無降雪期間におけるCSO流出量と流出負荷量の関係を示す。ここでは、実

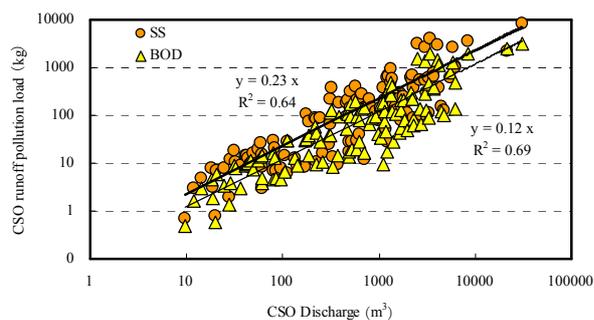


Fig.8 Relationship between CSO discharge and CSO runoff pollution load.

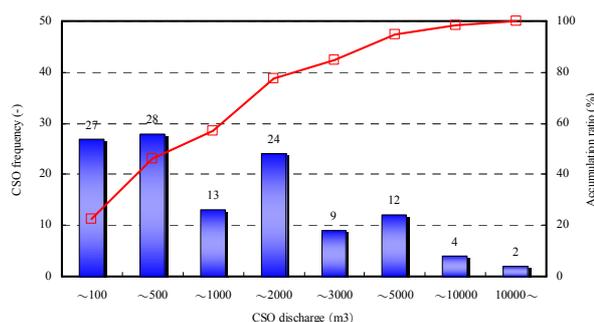


Fig.9 Relationship between CSO discharge and CSO frequency.

測値と解汚濁負荷解析によって算出されたCSO汚濁負荷量を含んだ全119データを用いた。結果、CSO流出量と流出負荷量の関係は線形であり、CSO流出量によって汚濁負荷量を推測することが可能となった。

4.3 対策シミュレーション

CSOが公共用水域へ与える影響は、ノンポイント汚濁負荷と比較して非常に大きくなることがわかった。汚濁負荷の流出を抑制するためには、再現性の高いモデルで対策シミュレーションを行い、対策施設の定量的な評価から改善効果を検証する必要がある。その中で貯留施設による対策は、合流式下水道の改善対策だけではなく、浸水対策等の効果が期待される施策である。更に、河川等への流出を抑制するため、CSOの流出量や流出回数、流出負荷量を包括的に削減させることが可能である。

そこで、本研究では、対策施設として貯留池をモデル化し、汚濁負荷シミュレーションから効果的な貯留規模の推定を行った。

4.3.1 現状の流出実態

流出汚濁負荷量の目標設定をするため、第一に現状の流出実態を把握することとした。2006年無降雪期間におけるCSO流出量と流出回数の関係をFig.9に示す。CSOの流出頻度は、CSO流出量500m³程度で累積比率が約50%に及ぶことがわかる。従って、500m³の貯留容量によって流出回数の数半減が可能となる。しかし、10000m³を越える大規模なCSO流出量は、頻度2回であるが、CSOの年間総流出量に占める割合は約27%となり、長時間降雨に伴うCSOの影響が大きいことが推察される。加えて、

Fig.8からCSO流出量が増大するほど流出負荷が比例的に上昇することからも、長時間降雨での改善対策の検討が示唆された。従って、2006年無降雪期間における長時間降雨を対象にCSO流出汚濁負荷量の削減目標値を算定することとした。

4.3.2 流出汚濁負荷目標値の設定

合流改善の目標として、国土交通省からCSO汚濁負荷量を分流式下水道から流出される汚濁負荷量と同程度以下までに削減することが掲げられている⁵⁾。

目標値は、対象区域を分流式下水道に置き換えた際の雨天時及び晴天時の放流負荷量を算定し、許容流出負荷目標値を求めた。結果、PointAではSS放流負荷目標値が1551.6kg、BOD放流負荷目標値が1455.4kgとなることが明らかとなった。

4.3.3 貯留施設のモデル化

本研究の貯留形式は、サンプリングを行っているPointAにおいて、遮集能力を上回り、河川へ流出されるCSOを貯留池に流入させ一時貯留するものとした。貯留量を超えるCSOは、河川へ流出し、貯留したCSOは降雨終了後に高級処理する方式とした。改善効果は、貯留池の容量を変更させて解析する事で検討を行った。

4.3.4 対策シミュレーション結果

貯留対策シミュレーション結果として、Table 6に貯留量による流出負荷量の解析結果と負荷削減率を示す。また、Fig.10に貯留規模と流出負荷量の関係を示す。

Table 6 Results of runoff pollution load and reduction rate.

Storage volume (m ³)	Rainfall conversion (mm)	SS		BOD	
		Runoff pollution (kg)	Reduction rate (%)	Runoff pollution (kg)	Reduction rate (%)
0	0	7099.8	-	2708.3	-
500	0.4	7009.4	1.3	2661.6	1.7
1000	0.8	6982.1	1.7	2651.8	2.1
2000	1.6	6827.8	3.8	2597.1	4.1
3000	2.3	6652.2	6.3	2532.9	6.5
6000	4.7	6061.0	14.6	2295.9	15.2
9000	7	5489.3	22.7	2063.7	23.8
12000	9.3	4883.8	31.2	1829.6	32.4
15000	11.7	4231.0	39.4	1572.1	40.7
18000	14.1	3653.9	47.7	1342.0	49.4
21000	16.4	3051.9	54.1	1117.7	55.9
24000	18.8	2453.3	63.1	898.6	64.5
27000	21.1	1881.0	65.7	690.6	66.5
30000	23.4	1400.3	74.5	510.5	75.3
Target value		1551.6	78.1	1455.4	46.3

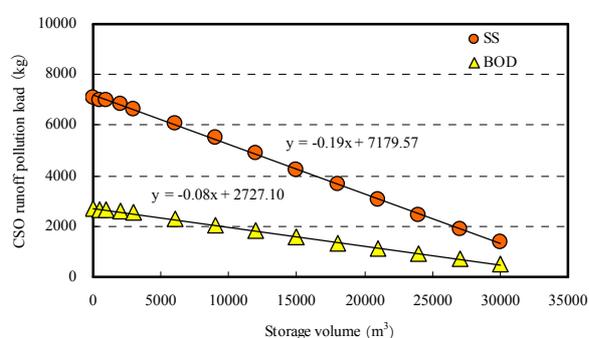


Fig.10 Relationship between storage volume and runoff pollution load.

Fig.10 から、貯留規模と流出負荷量は線形関係を示し、直線の一次式で回帰される結果が得られた。また、BOD よりも SS 負荷量の削減が困難であり、SS 削減目標を達成することが効率的な負荷削減となることが示唆された。また **Fig.10** の関係式から分流式下水道並みの目標流出負荷量を満たすためには、約 29000m³ の貯留量が必要となることが推算された。

以上のような結果から、対策施設をモデル化したシミュレーションから CSO の流出汚濁負荷を推算し、効果的な対策を講じることが可能になった。

5. 結論

本研究では、CSO の長期モニタリング調査から CSO の流出実態や流出特性を明らかにし、流出解析モデルを適用した汚濁負荷解析から、モデルの再現性や対策効果の検討を行った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) CSO 流出量に対する流出負荷量の履歴曲線は、時計回りのループを描き、SS は BOD よりも直線的なループを示すことがわかった。これによって、降雨初期に流出する汚濁負荷削減の必要性や、SS 汚濁負荷流出において路面等といった管路施設外からの負荷の流出現象も考慮する必要があることが推察された。
- 2) 2 地点同時の流量キャリブレーションから高い再現性を有するモデルを構築した。また、汚濁負荷影響因子の最適化を図ることで高い整合性を有する汚濁解析が可能となり、合流改善政策案への反映が可能となった。
- 3) 汚濁負荷シミュレーションから、年間で 86.7×10^4 kg の SS 汚濁負荷量、 51.4×10^4 kg の BOD 汚濁負荷量が公共用水域へ流出していることが明らかとなった。また、SS 汚濁負荷原単位は $67.7 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 、BOD 汚濁負荷原単位は $40.1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ と導出された。CSO は短時間かつ少規模な流出量であるが、非常に高負荷の汚濁水が公共水域へ流出していることが推察された。
- 4) CSO 流出量と流出負荷量は線形関係にあり、観測 CSO 流出量によって汚濁負荷量を推測することが可能となった。
- 5) 対策施設をモデル化したシミュレーションから CSO の流出汚濁負荷を推算し、効果的な対策を講じることが可能になった。

参考文献

- 1) 古米弘明 (2007) 市街地ノンポイント汚染対策技術と適用事例, 水環境学会誌, **30**(4), pp.172-175.
- 2) 和田安彦, 尾崎平, 村岡基 (2006) 下水道施設のリアルタイムコントロールによる合流式下水道改善に関する研究, 土木学会論文集 G, **62**(1), pp.201-210
- 3) 和田安彦, 三浦浩之 (1997) 都市域ノンポイント汚染源負荷の堆積・流出挙動モデルと流出制御に関する研究, 土木学会論文集, No.559/VII-2, pp.61-71
- 4) 和田安彦著 (1990) ノンポイント汚染源のモデル解析, 技報堂出版, pp.52-61
- 5) 社団法人日本下水道協会 (2002) 合流式下水道改善対策指針と解説, pp.11-12