合流式下水道越流水の長期観測と流出解析による 汚濁負荷の定量的評価

草場大作* 竹谷 究* 藤田昌一*
姫野修司* 小松俊哉*

Quantitative Evaluation of the Pollution Load Based on Long-Term Continuous Observation and Runoff Analysis Simulation of Combined Sewer Overflow

Daisaku KUSABA*, Kiwamu TAKEYA*, Shoichi FUJITA*,
Shuji HIMENO* and Toshiya KOMATSU*

* Dept of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology, Kamitomioka 1603-1, Nagaoka, Niigata 940-2188, JAPAN

Abstract

To reduce the pollution load caused by Combined Sewer Overflow (CSO), which significantly affects the properties of water for public use in the event of rain, effective measures are adopted after the outflow behavior and pollution load are carefully studied. In this research, an area of about 127 ha around the confluence zone located in Nagaoka City, Niigata was targeted, the outflow rate, the water quality of CSO and the amount of rainfall were continuously monitored for 1200 days. The observation was started in June 2004 at two points where chamber has been equipped. As a next step, a simulation model with high reproducibility was designed on the basis of the data obtained by continuous observation using MOUSE. Since the water quality was predicted using the model in the case when it could not be measured, the pollution load of CSO was accurately estimated. It was found that the pollution loads of SS and of BOD for eight months (from April to November) were 50×10^3 kg and 28×10^3 kg, respectively. In addition, we found that the pollution load basic units of SS and BOD were 59×10^3 kg km⁻² year⁻¹ and 33×10^3 kg km⁻² year⁻¹, respectively.

Key words: Combined Sewer Overflow (CSO), MOUSE, Pollution Load

1. はじめに

合流式下水道は、汚水と雨水を同一管渠で下水処理場へ移送する市街地のノンポイント汚濁負荷抑制効果を有した優れたシステムである一方、雨天時に大量の雨水と共に汚水が未処理のまま公共用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。現在、CSO による放流先水域の影響解析として SS、BOD、T-P、T-N 等の有機汚濁、大腸菌、重金属の評価等が進められている^{1,2)}。国土交通省は、当面の改善として、CSO と簡易処理水に対して汚濁負荷量の削減、未処理放流回数の半減、きょう雑物の流出防止と改善目標を掲げた³⁾。公共用水域の水環境を保全するためには、CSO 汚濁負荷の挙動を正確に把握し、効果的な対策を実施する必要がある。しかし、CSO は、気象条件など発生の予測が難しく、モニタリングは時間、労力、費用を要すること⁴⁾、CSO 流出汚濁負荷は雨天時の降雨や地表面の形状、先行晴天期間等によってその挙動が大きく異なるためその影響を明ら

かにすることは困難であるのが現状である。

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。流出解析モデルには MOUSE、InfoWorks CS、XP-SWMM 等があり、これまでに田中ら⁵⁾ や Bouteligier ら⁶⁾ によってモデル比較等が実施され、その有効性や実用性が示されている。また、Srinivasan ら⁷⁾ は米国コロンビアの流域下水道において、130ha を対象に 1999 年 10 月から 2000 年 6 月の降雨強度 $0.7 \sim 4$ mm・hr⁻¹ の降雨において流量観測を実施し、流量におけるモデル解析値と実測値が高い相関を得ていることが報告されている。脇岡ら⁸⁾ は、工種を屋根、道路、不透透域の 3 区分に分類し、土地利用の細密数値情報を利用した方法を提案している。流出解析モデルには地表面負荷堆積・流出モデル、管渠 (雨水桝) 内堆積・流出モデル、下水管内汚濁負荷輸送モデルが組み込まれている。地表面負荷堆積・流出に関しては、新矢ら⁹⁾ は、SS などの粗粒子および細粒子の負荷量の大半が降雨初期に流出すると推論している。財団法人下水道新技術推進機構¹⁰⁾ は、初期路面残存負荷量調査を実施し、

* 長岡技術科学大学 環境・建設系 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

流出解析モデルを適用して得られた初期路面負荷の検証を行うとともに、新たな初期路面負荷量に基づいた公共用水域への総流出汚濁負荷量試算例を示した。管渠内堆積負荷流出に関する研究として、糸井ら¹¹⁾や吉本ら¹²⁾は、2降雨の汚濁負荷(SS)観測データを用いて代表的な管渠内汚濁負荷輸送式である Ackers-White 式による汚濁負荷流出解析を行い、堆積物が存在する箇所の特的手法とその存在量を推定する手法を提案し、管路内の堆積物の流出現象を再現できたと報告している。向井ら¹³⁾は、堺市における合流式下水道の改善事例として、合流区域1519haに関して InfoWorks を用いて、3降雨の汚濁負荷(BOD)観測データを用いて、パラメータを決定し、年間汚濁負荷解析のシミュレーションを行い、吐き口11箇所から放流回数443回、放流負荷量 116×10^3 (kg)であったと報告している。

以上、これまでに分布型流出解析モデルによるシミュレーションが行われてきたが、CSOの年間汚濁負荷の求める際の多くは、2～3降雨による汚濁負荷パラメータ決定が中心である。具体的な改善目標設定や対策施設の計画策定とその効果の検証などに用いる場合には、様々な降雨条件によって発生するCSOの流出を流出解析モデルにより、高精度に流出挙動を再現する必要がある。したがって、年間を通した連続降雨によるCSO流出解析検証用の降雨、流出量、汚濁負荷濃度等のデータを蓄積し、それらを解析・評価することにより分布型モデルによる汚濁解析や対策評価の基礎的な知見となると考えられる。

そこで、本研究では、多降雨の解析結果から確立した流出解析モデルにより補完することで、より適切にCSOによる年間汚濁負荷量の推定を行うことを目的として、公共水域へ流出するCSOについて長期的(40ヶ月以上)に行われた連続モニタリング結果を用いて、モデルの汚濁負荷パラメータを決定し、汚濁負荷の推算を行い、CSOが河川へ与える影響の評価を行った。

2. CSOの長期モニタリング方法

2.1 対象処理区の概要

対象は新潟県長岡市の合流式下水道が採用されている中心市街地676haのうち、本研究ではFig. 1に示す駅周辺の約127haを対象とした。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。雨天時に、下水管内の汚水と混合し

Fig. 1 Investigation area in this study.

た雨水が雨水吐き室内の越流堰を越えて未処理で放流される構造になっている。そこで、公共用水域へ放流されるCSO放流状況の実態を把握するため、2004年6月8日からPoint Aにおいて長期間で連続降雨を対象としたモニタリング調査を実施した。また、2007年4月からPoint BにおいてもPoint Aと同様の流量計を設置し、流量のみ観測を開始した。本論文では、2007年12月まで観測を行った結果を用いた。

2.2 モニタリングシステム

Point Aに構築したCSO長期連続観測システムをFig. 2に示す。CSO流出量は、雨水吐き室の上流側流量と下流側流量の差分で算出する方式とし、雨水吐き室の上流側及び下流側に圧力式水位センサ及び超音波ドップラー式流速センサから構成される面速式流量計を設置した。また、0.1mm転倒桁型雨量計を設置し、流量と雨量を1分間隔で自動計測した。CSOのサンプリングは、確実にCSOを捕捉するために、起動条件やサンプリング間隔を任意に設定可能なオートサンプラーを設置した。採水方式は負圧吸引式によるもので、真空ポンプでタンクを負圧状態にし、下水管底から5cmの位置の採水口よりサンプルを採水ボトルに採取した。採水口は、合流管内に設置しているため、晴天時にも任意の時間設定でサンプリングが可能となっている。雨天時におけるCSOの採水条件は、水質挙動を正確に把握するため、また突発的に水質が大きく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ため、Table 1に示すように、越流開始直後の採水間隔を5分とし、12回行い、その後、10分で6回、1時間で2回、計20回採水し、CSOの水質挙動を把握できるようにした。CSO流出回数については、Point Aの水位が越流水位を越えてから、越流水位未満になるまでを1回とした。採水したサンプルは下水試験方法に沿って、各サンプルのSS及びBODの測定を行った。この方法で

Fig. 2 CSO Monitoring System (Point A).

Table 1 Sampling condition of CSO in this study.

			~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~

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を確認した。

3. 調査結果と考察

3.1 晴天時汚水のモニタリング調査

雨天時における CSO 汚濁負荷の流出特性を解析するために、まず、晴天時における汚水のモニタリングを行った。調査は、先行晴天期間が2日以上を条件に24時間（1時間間隔）の晴天時に調査を5回実施した。5回実施したモニタリングデータから、各時間ごとに平均し、汚水量変動率及び水質変動率を算出した結果を Fig. 3 に示す。晴天時汚水変動は、流量、SS、BOD 共に水質変動と同様に9～10時にピークを示し、BODは19時以降でも上昇傾向が見られる。一日平均で、汚水量は7894m³、SSは122mg・L⁻¹、BODは154mg・L⁻¹であった。

3.2 雨天時汚水のモニタリング調査

長期連続モニタリング結果（ハイドログラフ、ハイエトグラフ、水質測定結果）の一部を Fig. 4 に示す。結果の一例として2006年8月1日、6月15～16日、10月6～8日における降雨強度、流量、水質の連続データをそれぞれ Fig. 5 に示す。これら3降雨は、総降雨量が12mm～103mm、最大降雨強度は7.2mm・hr⁻¹～22mm・hr⁻¹となっている。3.1で示した晴天時における合流管内の平均水質と比較してもCSO発生初期段階から非常に高濃度の汚濁水（ファーストフラッシュ）が河川に流出していることがわかる。

CSOの例(a)は、降り始めの初期から降雨強度が高く、短時間かつ単発的にCSOが発生しているため、高濃度のCSOが生じたと考えられる。例(b)は比較的降雨強度が弱く、断続的になっているのが特徴である。ここの降雨強度は、一般的な雨水流出解析で使用されている浸透域の浸透能(10mm・hr⁻¹)より低く、屋根、道路（側溝・雨水ますを含む）に代表される不浸透面からの雨水流出が主たるものと推定される。このときは、先行晴天期間は1日に満たなかったが、CSOを発生させる降雨

Fig. 3 Daily variation of quality and quantity in dry weather flow.

Fig. 5 Change in Rainfall Intensity, Flow, SS and BOD concentration (August 1, 2006 (a), June 15-16, 2006 (b), October 6-8, 2006 (c)).

Fig. 4 A part of long-term continuous observation (Point A) : CSOs and Precipitation (1-15 July 2006).

では、降雨強度が弱くても水質の上昇が確認できた。また、例(c)は断続的降雨による複数回のCSOが発生しているが、再度降雨強度が高い降雨の時間帯（6日21時頃）において、ファーストフラッシュより汚濁濃度は低いものの、2回目のピークを示すセカンドフラッシュが確認された。また、4回目のCSO（7日15:20～15:50水質観測）では水質が晴天時レベルにまで減少した。このような降雨パターンでは、河川への流出時間は数時間から数十時間、かつ断続的に生じているため、河川に与える汚濁負荷は非常に大きくなることも考えられる。なお、目視による吐き口付近の現地調査においても、管内に付着した油分を主とするオイルボールや汚濁物質がCSO発生後に流出していることも確認した。

また、本研究では降雨によるCSOが起こる無降雪期間（4月～11月）と、降雪と地下水由来の融雪により常時CSOが吐き出される降雪期間（12月～3月）に分けた。Fig. 6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。また、観測開始が2004年の6月からのため、2004年は6～12月までのデータである。流出回数は、最大で53回の差がみられた。また、2004年は流出量が最大であるが、流出回数は4年中で最多数でない。これらの結果から、気象条件の影響を大きく受けるCSOは同一地点においても、各年で大きく流出回数、流出量は異なり、更に流出回数と流出量は明確な関連性がないことが明らかとなった。

Fig. 6 Change in the number of CSOs and total discharge volume from April to November (Point A).

*The observation period of 2004 from June to November.

Table 2 Characteristics of using calculated rainfall events.

No.	Date	Dry weather	Rainfall		Maximum
		period day	Amount (mm)	Duration (min)	intensity (mm/hr)
①	2006.4.8	2.4	36.1	1008	8.2
②	2006.5.11	3.0	12.7	616	7.2
③	2006.5.23	3.7	13.7	385	14.4
④	2006.5.28	0.3	13.1	785	19.2
⑤	2006.6.15-16	1.0	11.6	773	7.2
⑥	2006.6.27	4.1	11.6	433	27.6
⑦	2006.6.30-7.1	3.4	119	2891	51.6
⑧	2006.7.11-12	1.4	83.4	1805	37.2
⑨	2006.7.21	1.8	12.1	340	18.0
⑩	2006.8.1	3.5	22.5	265	21.6
⑪	2006.9.12-14	4.5	37.2	2845	9.6
⑫	2006.11.7	0.3	31.8	1158	8.4
⑬	2007.5.25	5.2	14.5	321	12
⑭	2007.7.2	1.1	24.4	535	10.8
⑮	2007.7.25-26	4.4	80.6	1053	69.6
⑯	2007.8.22	2.1	38.9	595	36

た。したがって、流出回数を半減させることにより必ずしも十分に流出量を低減させることにはならない事が懸念された。

4. 流出解析モデルを適用した汚濁負荷解析

4.1 流出解析モデルのパラメータ決定方法

本研究では、分布型流出解析モデル(MOUSE)を用いて実測データと高い再現性を有した汚濁負荷シミュレーションにより欠損区間を予測して、実測を補完することで、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と考えた。

シミュレーションを行うためには、下水道ネットワークデータ、地表面特性、降雨データ、流出に関するパラメータ、汚濁負荷に関するパラメータ等のデータを定義し、作成・設定することにより解析を行うことができる。下水道ネットワークデータとして、下水道台帳より対象区域の全管網データを入力した(幹線1本、枝線29本、ノード数1258、リンク数1257)。入力した管径は150～2000mm、Point Aの集水面積は127ha、Point Bは109haと全体の86%を占めている。地表面特性として、修正RRL法のパラメータを参考にし、CSO流出量のキャリブレーションより、流出率0.45、流達時間5min、初期損失0mmと設定して解析を行った。地表面流出モデルにはタイムエリア法を適用し、流出ハイドログラフを得た。汚濁負荷解析には、地表面の汚濁負荷流出解析と、降雨による堆積物の剥離モデルから汚濁負荷(SS, BOD)を求めた。対象降雨として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おいて、流量、汚濁負荷(SS, BOD)のシミュレーションと実測値の整合性を検証した。流量においては、2007年4月からはPoint Bもキャリブレーションを行った。その際に、解析結果の適合性評価手法として(1)式と(2)式に示す合致率と適合度¹⁵⁾を用いた。

Fig. 7 Result of the flow calibration with MOUSE (⑭)

Fig. 8 Results of the pollution load analysis with MOUSE (⑦, ⑩)

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

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

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 CSO 流出量の合致率と適合度を **Table 3** に示す。平均で 98% 程度の合致率が得られた。解析結果の一例として、⑭を **Fig. 7** に示す。⑭のハイドログラフから、解析値はほぼ実測値を再現できていることがわかる。実測総流量に対する解析総流量の割合を表す適合度も Point A, B で共に比較的高い値が得られた。

さらに、MOUSE では地表面堆積・流出及び管渠（雨水桝）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。これら汚濁負荷影響因子の最適化を図った。**Fig. 8** 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点で、概ね実測との最適化が図れた。この結果から全ての降雨において汚濁負荷解析を行うために、パラメータを降雨特性によって 3 つのタイプに分類することとした。Type A は、単発降雨のみを採用した。この際に、降雨強度は 5 ~ 40mm/hr の範囲の降雨を対象とした。Type B は、河川への流出時間が数時間程度であり、断続的に複数回発生する降雨を採用した。また、この特徴を有した降雨は、降雨初期から降雨強度 10mm/hr 以下の降雨が多いために、降雨強度 10mm/hr の降雨を対象

とした。Type C は、河川への流出時間が、数時間から数十時間と数日に渡り流出し、総降雨量が 50mm 以上、降雨強度 30mm 以上の降雨を対象とした。**Table 3** に示した 15 降雨に対して各降雨毎に汚濁負荷パラメータ（表面流出水質、堆積物、雨水桝における体積物）を入力し、実測汚濁負荷量と高い整合性が得られるまで繰り返し、パラメータを得た。決定したパラメータを **Table 4** に示す。

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蓄積とその実測データに基づいた流出解析モデルを用いることで高い整合性を有する汚濁負荷解析による合流改善対策案への反映が可能となると考えられる。これまでの流出モデルによる解析での合致率、適合度は和田ら¹⁴⁾ は、BOD 負荷量は合致率 69 ~ 79%、適合度 0.82 ~ 1.4 と報告している。本研究では、合致率は 71.8 ~ 97.8 となり、半数以上が 90% 以上となった。適合度においては Type C の降雨⑦、⑧で解析負荷量が実測負荷量を下回り、降雨⑥、⑨、⑬においては解析負荷量が実測負荷量を上回る結果となった。**Fig. 8** の左図より、Type C は総降雨量、降雨強度ともに高く、断続的な管路内のフラッシングによる継続的な CSO が観測される流出パターンであり、複雑な流出パターンに対するパラメータ設定は本研究の今後の課題と言える。

4.2 年間汚濁負荷量の推算と汚濁負荷原単位の導出

本研究では、過去 4 年のモニタリングにおいて最も流出回数の多かった 2006 年を対象に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することとした。

構築されたモデルを用いて、水質欠損期間の汚濁負荷

Table 3 Results of concordance rate and goodness of fit.

No.	Date	Type	Point A						Point B	
			Discharge		Pollution load		BOD		Discharge	
			Concordance (%)	Goodness (-)	Concordance (%)	Goodness (-)			Concordance (%)	Goodness (-)
①	2006.4.08	B	99.4	0.98	92.7	0.71	93.6	0.88	No data	
②	2006.5.11	B	99.1	0.99	90.6	1.21	93	1.11		
③	2006.5.23	A	98.3	0.91	91.2	0.85	92	0.84		
④	2006.5.28	A	98.5	0.9	93	0.9	90.7	1.16		
⑤	2006.6.15-16	B	99	0.96	88.4	0.8	80.5	1.6		
⑥	2006.6.27	A	94.9	1.28	96	1.02	94.5	0.91		
⑦	2006.6.30-7.1	C	98.6	0.71	88.5	0.65	85	0.7		
⑧	2006.7.11-12	C	99.4	0.73	95.1	0.92	97.8	0.71		
⑨	2006.7.21	B	95	1.39	94.3	1.05	89.3	0.92		
⑩	2006.8.1	A	98.6	0.89	92.5	1.12	92.6	0.8		
⑪	2006.9.12-14	B	98.8	0.91	92.4	1.08	91.8	1.16		
⑫	2006.11.7	B	98.6	0.88	89	1.35	87.5	1.31		
⑬	2007.5.25	A	98.1	1.15	90	1.24	71.8	1.91	97.4	0.9
⑭	2007.7.2	B	99	0.99	88.1	1.26	86.5	1.05	98.8	0.97
⑮	2007.7.25-26	-	98.5	0.74	No data				96.9	0.64
⑯	2007.8.22	A	98.1	0.88	79.8	1.58	88.2	1.27	98.4	1.1
Average			98.2	0.94	90.8	1.05	89	1.09	97.9	0.9

Table 4 Analysis Conditions.

Parameter	Type A (N=6)	Type B (N=7)	Type C (N=2)
Surface sediment build up rate (kg・ha ⁻¹ ・day ⁻¹)	900	370	9963
Detachment rate (m・hr ⁻¹)	0.001	0.001	0.0001
Dry Weather Period (day)	2.4	1.7	2.4
Gully pot build up rate SS (mg・L ⁻¹ ・day ⁻¹)	1500	1225	750
BOD(mg・L ⁻¹ ・day ⁻¹)	1200	413	750

Table 5 Results of 8months pollution load (2006).

	Pollution Load (8 months)		
	Measured (× 10 ³ kg)	Simulated (× 10 ³ kg)	Σ (× 10 ³ kg)
SS	20 (N=53)	30 (N=67)	50
BOD	12 (N=50)	16 (N=70)	28

シミュレーションを行い CSO 年間汚濁負荷量と汚濁負荷原単位の推算を行った。CSO 年間汚濁負荷量は実測負荷量 (kg) と予測汚濁負荷量 (kg) から求め、Table 5 には CSO 毎の SS, BOD 汚濁負荷量及びそれぞれの流出回数を示した。観測は無降雪期間 (8 ヶ月) のみ行っており、実測された汚濁負荷量は SS と BOD でそれぞれ 53, 50 回であった。実測汚濁負荷量の算出方法は、Table 1 に示すオートサンプラーのサンプリング間隔で測定された濃度に、観測した流量を乗ずることにより、実測汚濁負荷量を算出した。また、シミュレーションによる解析値は SS で 67 回、BOD で 70 回となった。Table 5 より無降雪期間の汚濁負荷量は、SS で $50 \times 10^3 \text{ kg}$ 、BOD で $28 \times 10^3 \text{ kg}$ となった。また、Table 6, Table 7 には CSO 毎のシミュレーションと実測による SS, BOD の汚濁負荷量とその割合をそれぞれ示した。Table 8 には各 Type 別の降雨回数と CSO 流出量及びそれぞれの割合を示した。

Table 6 より Type B の SS, BOD のシミュレーション回数がそれぞれ 38 回と 40 回、汚濁負荷寄与率では 46%, 52% と最大となった。Table 7 より、Type C の CSO は 6 回と最少であるが、汚濁負荷量では SS, BOD とともに 56%, 58% と最も大きな寄与率を示した。Table 8 より、降雨の発生頻度においても Type A で最も多く 54% を占めたが、Type C では発生頻度が 4 回と最も少ないにも関わらず、降雨が発生した際には長時間に渡り CSO が流出するため、CSO 流出量で 39% と最大となった。CSO は気象や下水管の敷設状況によって大きく特徴が異なるため、これまで Type C のような降雨の CSO についての研究報告は少なく、今後このような Type の降雨についてデータを蓄積し、解析精度を高めていくことが重要である。

Table 6 Contribution rate of rainfall types in Simulated (8 months).

	Pollution Load					
	SS			BOD		
	N (-)	Load ($\times 10^3 \text{ kg}$)	Contribution (%)	N (-)	Load ($\times 10^3 \text{ kg}$)	Contribution (%)
Total	67	29.8	100	70	16.0	100
Type A	16	4.5	15	17	2.2	14
Type B	38	13.8	46	40	8.3	52
Type C	13	11.5	39	13	5.5	34

Table 7 Contribution rate of rainfall types in Measured (8 months).

	Pollution Load					
	SS			BOD		
	N (-)	Load ($\times 10^3 \text{ kg}$)	Contribution (%)	N (-)	Load ($\times 10^3 \text{ kg}$)	Contribution (%)
Total	53	20.1	100	50	11.7	100
Type A	22	4.4	22	21	2.5	21
Type B	25	4.4	22	23	2.4	21
Type C	6	11.3	56	6	6.8	58

Table 8 Contribution rate of rainfall types (8 months).

	N (-)	Contribution (%)	Discharge ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Contribution (%)
Total	50	100	200	100
Type A	27	54	50	25
Type B	19	38	71	36
Type C	4	8	79	39

降雪期間には降雪による雨量と融雪によって、定量的に CSO を観測することが困難なため、無降雪期間である 8 ヶ月間を 1 年間 (12 ヶ月間) に換算し汚濁負荷量を換算した。その結果 SS で $75 \times 10^3 \text{ kg}$ 、BOD で $42 \times 10^3 \text{ kg}$ の汚濁負荷量が公共用水域へ流出していることが推算された。また、SS 汚濁負荷原単位は $59 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 、BOD 汚濁負荷原単位は $33 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ となることも推算された。山下¹⁵⁾ は合流対象区域 151 ha のポンプ場において年間汚濁負荷量 (BOD) は $19.24 \times 10^3 \text{ kg}$ と報告しており、汚濁負荷原単位を算出すると $12.7 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ となる。本論文で得られた原単位は合流対象区域が 127 ha と、これより狭小であるが、汚濁負荷原単位 (BOD) では 2.5 倍程度の値となった。また、年間の平均越流水質も山下¹⁵⁾ の研究では $19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ にあるのに対して、本論文における平均水質は $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上であることから、本研究で対象とする地域は、高負荷の汚濁物質が公共水域へと流出しているといえる。和田ら¹⁶⁾ はノンポイント汚染の各用途地域別の負荷原単位として、商業地域における路面堆積負荷原単位が SS で $1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 、BOD で $0.05 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ と報告している。和田らの報告は、ノンポイント汚染の河川への汚濁負荷であり、場所も異なるため、直接比較することは難しいが、これらの値と比較しても本論文で得られた CSO 汚濁負荷量は、SS で 59 倍以上、BOD で 660 倍以上と汚濁負荷原単位で見てもノンポイント汚染の汚濁負荷原単位より大きい結果となった。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 汚濁負荷量は降雨が下水道管渠内に流入し、その一部が更に河川へ流出するため、CSO は降雨の一部の流出量から算出した値であることを考えると、CSO は短時間かつ小規模な流出量であるが、多量の汚濁水が公共水域へと流出している可能性も懸念された。

5. 結論

本研究では、CSO の長期モニタリング調査に基づいて CSO の流出実態を明らかにした。これらのデータから 15 降雨を用いて、3 パターンに分類した汚濁負荷パラメータを決定することで、多くの降雨において高い整合性を有する汚濁負荷解析が可能と考えられた。

さらに、汚濁負荷シミュレーションと実測値から、無降雪期間中である 8 ヶ月間では、 $50 \times 10^3 \text{ kg}$ の SS 汚濁負荷量、 $28 \times 10^3 \text{ kg}$ の BOD 負荷量が公共用水域へと流出していることが推算された。また、8 ヶ月間の汚濁負荷値から年間汚濁負荷に換算すると、SS 汚濁負荷原単位は $59 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 、BOD 汚濁負荷原単位は $33 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ と推算された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、長岡市役所 下水道課の皆様には多大なご協力、ご支援賜りました。また、山本勝利氏をはじめ緑水工業株式会社の皆様には、流量計精度確認実験についてご支援を賜りました。ペンタフ株式会社 雨車仁司氏にはメンテナンスをはじめ、測定機器全般について幅広くご指導、ご助言を賜りました。流出解析モデルの解析手法について、株式会社 日水コン

服部貴彦氏、株式会社 建設技術研究所 石川美宏氏にご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

(原稿受付 2009年 5 月 14 日)

(原稿受理 2010年 3 月 11 日)

参 考 文 献

- 1) 石上孝浩, 小野田吉恭, 古谷猛裕 (2006) 合流式下水道雨天時越流水による放流先河川への影響解析について (その2), 第43回下水道研究発表会講演集, 287-289.
- 2) 野沢直也, 和田安彦, 尾崎平 (2007) 合流式下水道越流水中の重金属負荷量の定量に関する研究, 第44回下水道研究発表会講演集, 289-291.
- 3) 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.64-207.
- 4) 高相恒人 (2002) CSOによる影響の把握—実態調査結果と今後のモニタリングについて—, 水環境学会誌, **25** (9), 533-536.
- 5) 田中修司, 榊原隆, 百崎和博, 千葉恭人, 古北克, 宮田篤 (1996) 雨天時汚濁負荷量流出解析モデル比較検討調査, 第33回下水道研究発表会講演集, 249-251.
- 6) Raf Bouteligier, Guido Vase, Jean Belamont (2004) Urban drainage water quality modeling software: the practical use of InfoWorks CS and Mouse Trap, *NOVATECH 2004*, 423-430.
- 7) Srinivasan Rangarajan, Monir Chowdhury, John F. Cassidy (2002) Sewer System Modeling in the District of COLUMBIA, *9th International Conference on Urban Drainage*.
- 8) 脇岡靖明, 古米弘明, 市川新 (2001) 下水道台帳データベースと細密数値情報を利用した分布型モデルによる都市雨水流出解析, 下水道協会誌, **38** (469), 79-90.
- 9) 新矢将尚, 小西孝明, 宮西弘樹, 石川宗孝 (2002) 高速道路排水における汚濁負荷の流出特性, 用水と廃水, **44** (3), 11-17.
- 10) 財団法人下水道新技術推進機構 (2006) 公共用水域における汚濁負荷量に関する調査研究, 下水道新技術研究所年報 (2/2), 71-75.
- 11) 糸井優輔, 古米弘明, 中島典之 (2004) 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, **32**, 183-190.
- 12) 吉本健太郎, 荻木新一郎 (2005) 管渠内堆積物の分布特性を考慮に入れた流出解析モデルによる汚濁負荷量解析, 第42回下水道研究発表会講演集, 369-371.
- 13) 向井一裕, 越智慶吾, 金泰成 (2006) 堺市における合流式下水道改善計画の事例報告, 第43回下水道研究発表会講演集, 293-295.
- 14) 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), 201-210.
- 15) 山下雄一, 松田研志 (2005) I市における合流式下水道改善計画の事例報告, 第42回下水道研究発表会講演集, 396-398.
- 16) 和田安彦 (1990) ノンポイント汚染源のモデル解析, pp.52-61, 技報堂, 東京.