

市街地雨水汚濁負荷量の測定・計画手法に関する調査

下水道研究室 室長 藤生 和也
主任研究官 吉田 敏章
研究官 田本 典秀

1. はじめに

下水道整備をはじめとする点源対策の進展に伴い、ノンポイント負荷が公共用水域の水質に与える影響は次第に大きくなっているが、特に閉鎖性水域の水質を考える際にはノンポイント負荷の影響を無視することができない。湖沼の水質問題に関しては、改正「湖沼水質保全特別措置法」が平成 18 年 4 月に施行され、この法律では市街地や農地などから流出する汚濁負荷への対策が必要な地区を「流出水対策地区」に指定し、同地区内で重点的にノンポイント負荷対策を講じられるようになった。市街地において下水道が汚濁負荷の削減に大きな役割を担っていることは論を俟たないが、下水道事業の中で有効なノンポイント負荷削減対策を実施し、かつ有効な成果を挙げるためには、最も基礎的な情報である発生・流出負荷量と、対策の実施により見込まれる削減効果を的確に把握する必要がある。

平成 18 年度は、平成 16 年度から引き続いて市街地ノンポイント負荷の実測調査を行い、流出負荷量の予測手法につき検討を行うとともに、市街地ノンポイント負荷削減対策の有効な手段の一つとして考えられている雨水浸透ますの汚濁負荷削減効果を明らかにする目的で流出実験を行った。

2. 市街地ノンポイント負荷対策の現状

現状におけるノンポイント負荷対策の実態把握と課題抽出を行う目的で、全国の自治体を対象にアンケート調査を実施した。アンケートは平成 19 年 1 月から 3 月にかけて、都道府県及び政令指定都市に依頼し回答していただく方法を採用した。このとき、各都道府県管内の市町村に該当する事例がある場合には、アンケート票を該当の市町村に転送していただき、全国すべての事例を網羅するよう留意した。

質問内容は表-1 に示すとおりである。質問Ⅱ、Ⅲについては、該当ある場合のみ回答いただいた。以下、「対策事例」、「関連計画」はそれぞれ「市街地から主に雨水を介して流出するノンポイント負荷を削減する対策（雨水浸透、貯留、植生浄化など）の事例」、「市街地ノンポイント対策に関連する計画（流総計画や湖沼水質保全計画など）」指すものとする。

市街地ノンポイント負荷対策以外の事例（雑排水処理事業など）を排除してアンケートを集計したところ、表-2 のとおり関連計画・対策事例が整理された。関連計画数は 11、対策事例数は 4 であり、現状では市街地ノンポイント負荷対策がほとんど進捗していないことが改めて浮き彫りとなった。関連計画については、市街地ノンポイント負荷に削減負荷量の割り当てが定められていたものは 11 計画中 2 計画であり、市街地ノンポイント負荷の削減に向けては、関連計画の大半が具体性を有していなかった。

関連計画・対策事例のいずれも有しない都道府県・政令指定都市に対し、なぜ対策を実施していないか尋ねた

表-1 アンケートの内容

大項目		小項目
質問Ⅰ	全体の概要	1. 市街地面源負荷対策に関連する計画および対策事例数 2. 市街地面源負荷対策を実施していない場合、その理由
質問Ⅱ	市街地面源負荷対策の関連計画	1. 市街地面源負荷対策関連計画の名称と概要 2. 市街地面源負荷量の取り扱い 3. 市街地面源対策の同計画における位置づけ 4. 計画の進捗状況と策定時の技術的な苦労点
質問Ⅲ	市街地面源負荷対策の事例	1. 市街地面源負荷対策の概要と計画諸元 2. 対策実施のための費用 3. 対策による効果の評価方法 4. 対策施設の維持管理状況 5. 対策実施にあたり技術的な苦労点

表-2 関連計画及び対策事例一覧

都道府県名	市町村名	関連計画		対策事例	
		計画数	計画名	事例数	事例名
神奈川県 千葉県	横浜市	1	東京湾流域別下水道整備総合計画	1	市街地排水浄化対策事業 手賀沼流域下水道湖北貯留場
		2	利根川流域別下水道整備総合計画 手賀沼に係る湖沼水質保全計画		
茨城県 長野県		1	霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画	1	諏訪湖流域下水道事業 雨水貯留槽
		2	諏訪湖水質保全計画		
愛知県		3	天竜川流域別下水道整備総合計画		
			名古屋港海域等流域別下水道整備総合計画		
			知多湾等流域別下水道整備総合計画		
滋賀県 鳥取県		1	琵琶湖水質保全対策行動計画	1	山寺川市街地排水浄化対策事業
			中海に係る湖沼水質保全計画		
広島県	坂町			1	水循環創造事業
合計		11		4	

ところ、多くの自治体で現在も面整備や合流改善事業を優先させていること、制度や財源に問題があること、ノンポイント負荷の実態把握が困難で問題として認識できないこと、等の理由が挙げられた。関連計画・対策事例の詳細等を含め、アンケート結果は文献 1) に詳しいので参照されたい。

3. 市街地ノンポイント負荷の実測調査

3. 1 調査方法

調査対象地域は、分流式下水道が整備された市街地で、それぞれに異なる土地利用を有する 3 つの排水区 (A、B 及び C 排水区) である。A、B、C 排水区の面積はそれぞれ、95、18、67ha であり、不浸透面積率は 3 排水区とも概ね 60~70% の範囲にあった²⁾。今年度の調査は、表-3 の Rainfall 5 に示す 1 降雨を対象とし、A 及び C 排水区で実施した。なお、各排水区の採水地点では水位 (予め求めた水位-流量曲線から流量に換算) を、採水地点の近傍では雨量をそれぞれ 5 分間隔で計測した。

雨水の採水は作業員の手による直接採水とし、一降雨あたり 15 本の試料を採取した。分析の対象とした水質項目は、SS、VSS、BOD、COD_{Mn}、TN、TP、重金属 (銅、亜鉛、鉛、カドミウム) とし、過年度に実施した調査では、ベンゾ(a)ピレン (B(a)P)、ビスフェノール A (BPA) も併せて分析した。水質分析にあたっては、いずれの水質項目も下水試験方法に従った。

3. 2 調査結果

一降雨あたり平均水質 (EMC: Event Mean Concentration) 及び比流出負荷量をそれぞれ表-4、5 に示す。EMC に関しては、各排水区で SS、BOD、COD、TN、TP、亜鉛で概ね環境基準を超え、降雨中の雨水が相当程度汚染されていることが確かめられた。環境基準値のない B(a)P についても、生態系に対し影響を及ぼさないと予想される濃度 (PNEC: 予測無影響濃度) を大きく上回る濃度で流出しており、放流先の生態系に無視できない影響を与えている可能性が示唆された。

一降雨あたり比流出負荷量については、A 排水区と B・C 排水区の間で大きな差が認められた。原因の一つとして、土地利用状況の違いが考えられる。A 排水区は都市の中心市街地で、幹線道路を有している。一方、B・C 排水区は主に住宅地であり、かつ、表-3 に示すとおり流出係数が非常に小さく、不浸透面積率で表されているより

表-3 調査対象降雨

	Drainage area A				Drainage area B				Drainage area C			
	NDD (d)	Total (mm)	Max (mm/hr)	Runoff coefficient	NDD (d)	Total (mm)	Max (mm/hr)	Runoff coefficient	NDD (d)	Total (mm)	Max (mm/hr)	Runoff coefficient
Rainfall 1	7	14.5	2.5	0.27	7	15	3.5	0.06	7	14.5	3	0.05
Rainfall 2	10	6	2.5	0.48	10	9.5	2.5	0.27	10	8	2.5	0.14
Rainfall 3	63	37.5	11	0.85	63	42.5	10.5	0.04	63	43.5	9.5	0.07
Rainfall 4	3	16.5	6	0.47	-	-	-	-	12	15.5	5.5	0.08
Rainfall 5	2.5	27	8.5	0.50	-	-	-	-	2.5	17.5	7.5	0.26

Note ; NDD: Number of prior dry weather days (d), Total: Total precipitation (mm), Max: Maximum precipitation intensity (mm/hr), "-" means field survey was not conducted.

表-4 一降雨あたり平均水質 (EMC)

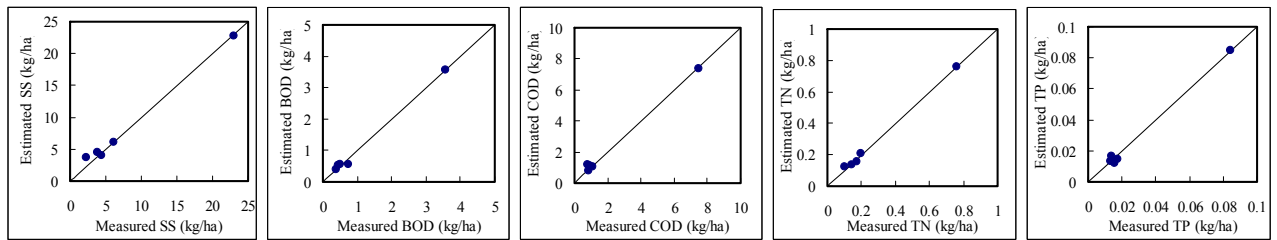
		SS (mg/L)	BOD (mg/L)	CODMn (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	BPA (μ g/L)	B(a)P (μ g/L)
Drainage area A	Rainfall 1	66	12.8	15.5	2.9	0.30	-	0.07	0.008	0.001	0.21	0.007
	Rainfall 2	86	19.8	29.3	4.0	0.51	0.06	0.35	N.D.	N.D.	0.23	0.025
	Rainfall 3	72	11.2	23.5	2.4	0.27	0.27	1.10	0.006	N.D.	0.08	0.011
	Rainfall 4	62	5.4	12.0	2.0	0.22	0.03	0.25	0.021	0.004	-	-
	Rainfall 5	45	3.4	8.0	1.4	0.02	0.02	0.08	0.000	N.D.	-	-
	Mean	66	10.5	17.6	2.6	0.26	0.09	0.37	0.009	0.001	0.17	0.015
Drainage area B	Rainfall 1	27	4.0	5.7	2.1	0.12	0.00	0.04	2.300	3.354	0.11	0.018
	Rainfall 2	83	21.3	28.9	3.3	0.25	0.04	0.38	0.015	N.D.	0.67	0.041
	Rainfall 3	84	6.5	11.0	2.1	0.24	0.20	0.38	0.000	N.D.	-	-
	Mean	65	10.6	15.2	2.5	0.20	0.08	0.26	0.772	1.118	0.39	0.030
Drainage area C	Rainfall 1	31	5.7	9.5	2.7	0.11	0.04	0.09	N.D.	N.D.	0.08	0.014
	Rainfall 2	54	12.4	20.2	2.4	0.16	0.05	0.14	0.001	N.D.	0.16	0.033
	Rainfall 3	68	7.0	11.4	1.6	0.19	-	-	-	-	-	-
	Rainfall 4	29	3.2	6.5	1.7	0.07	0.12	0.07	0.014	0.003	-	-
	Rainfall 5	30	2.4	6.7	1.4	0.09	0.03	0.06	0.000	N.D.	-	-
	Mean	42.5	6.1	10.9	2.0	0.12	0.06	0.09	0.004	0.001	0.12	0.023
EQS		25	(2, 3)	(3, 5)	(0.4, -)	(0.03, 0.05)	-	0.03	0.01	0.01	-	-
PNEC		-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	0.005

Note: "N.D." means not detected. "-" means deficiency, not measured, or not applicable. In EQS of BOD, CODMn, TN, and TP, (,) means (EQS of receiving water of Drainage areas A and B, EQS of receiving water of Drainage area C).

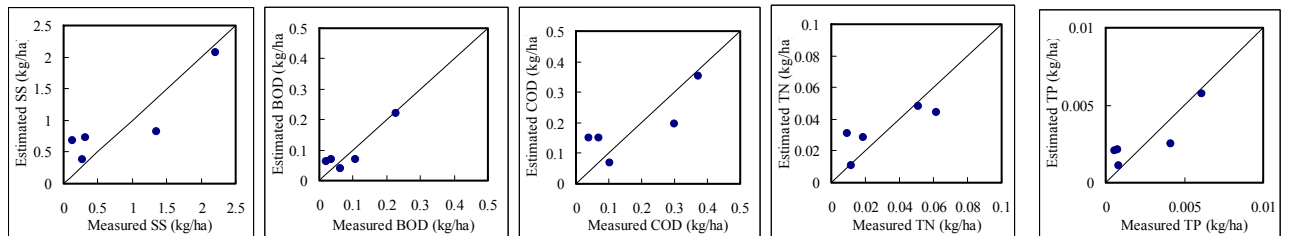
表-5 一降雨あたり流出負荷量

		SS (kg/ha)	BOD (kg/ha)	CODMn (kg/ha)	TN (kg/ha)	TP (kg/ha)	Cu (g/ha)	Zn (g/ha)	Pb (g/ha)	Cd (g/ha)	BPA (mg/ha)	B(a)P (mg/ha)
Drainage area A	Rainfall 1	3.83	0.751	0.908	0.172	0.0174	-	4.4	0.49	0.035	12.04	0.42
	Rainfall 2	2.25	0.519	0.767	0.104	0.0135	1.6	9.1	N.D.	N.D.	6.05	0.65
	Rainfall 3	22.95	3.566	7.478	0.763	0.0845	84.6	349.2	1.87	N.D.	24.79	3.65
	Rainfall 4	4.44	0.382	0.852	0.145	0.0156	1.8	17.8	1.53	0.250	-	-
	Rainfall 5	6.07	0.458	1.083	0.196	0.0136	2.4	11.5	0.057	N.D.	-	-
	Mean	7.91	1.14	2.22	0.28	0.03	22.57	78.39	0.79	0.06	14.29	1.58
Drainage area B	Rainfall 1	0.17	0.026	0.037	0.013	0.0008	0.0	0.2	0.02	0.022	0.73	0.12
	Rainfall 2	0.47	0.122	0.165	0.019	0.0014	0.2	2.2	0.09	N.D.	3.84	0.23
	Rainfall 3	1.34	0.103	0.175	0.033	0.0039	3.2	6.0	0.00	N.D.	-	-
	Mean	0.66	0.083	0.126	0.022	0.0020	1.1	2.8	0.03	0.007	2.28	0.18
Drainage area C	Rainfall 1	0.14	0.027	0.045	0.013	0.0005	0.0	0.4	N.D.	N.D.	0.35	0.06
	Rainfall 2	0.27	0.063	0.103	0.012	0.0008	0.3	0.7	6.18	N.D.	0.84	0.17
	Rainfall 3	2.21	0.226	0.372	0.051	0.0061	-	-	-	-	-	-
	Rainfall 4	0.32	0.035	0.071	0.019	0.0008	1.3	0.7	0.16	0.029	-	-
	Rainfall 5	1.36	0.108	0.300	0.062	0.0041	1.2	2.9	0.00	N.D.	-	-
	Mean	0.86	0.09	0.18	0.03	0.00	0.7	1.2	1.6	0.0	0.59	0.11

Note: "N.D." means not detected. "-" means deficiency, or not measured.



(a) A 排水区



(b) C 排水区

図-1 重回帰式による一降雨あたり流出負荷量の予測結果

も浸透能力の大きい可能性がある。

表-5の結果を基に、次式に示すように総降雨量と先行無降雨日数を独立変数として重回帰分析を行ったところ、**図-1**のとおりの結果が得られた。

$$L = a \cdot \sum r + b \cdot NDD \quad (式1)$$

(L : 一降雨あたり流出負荷量 (kg/ha)、 $\sum r$: 総降雨量 (mm)、 NDD : 先行無降雨日数 (day)、 a, b, c : 定数)

図-1より、本調査で得たデータからは、一降雨あたり流出負荷量は概ね式1によって説明されているといえる。ただし、A排水区では、総降雨量、先行無降雨日数ともに大きかった Rainfall 3 での流出負荷量に影響を受けていることに注意が必要である。決定係数については、**図-1**に示したケースはすべて0.8以上の値であった。

このような予測手法の信頼性が確認できれば、今後ノンポイント負荷削減のための計画策定や対策施設の設計時などに、厳密ではないとしても、ある程度の合理性を有する値として用いることができる可能性がある。今後さらにデータを蓄積し、この予測手法に一般性があるか否かにつき検討する必要があると考えられる。

4. 雨水浸透ますの汚濁負荷削減効果に関する実験

雨水浸透は、雨水流出量の減少による浸水対策としての効果、湧水の復活といった水循環の再生など、多面的な効果を有する施策である。平成18年度は雨水浸透ますのノンポイント負荷削減機能に着目し、その汚濁負荷削減効果を把握するため流出実験を行った。

4. 1 実験方法

D市住宅地の道路に設置された雨水ます、雨水浸透ますそれぞれ4基を対象に、人工降雨(ます内への注水)による流出調査を行った。人工降雨は、清水(水道水)と人工的に作成した濁水(付近の雨水ますから堆積物を採取し、水道水と混合したもの)の2種類を用い、流入水及び流出水の水質、流量を測定した。なお、濁水実験においては、累積流量がおよそ120L(2mm/hに相当)を超えた後、清水に切り替えることとした。これは、路面負荷のファーストフラッシュを単純に表現したものである。

流入水はタンクからポンプで送水し、ますの側壁からます内に注水した。流出水の水質測定は注水前にタンク内の水を採水し、流出水の水質については下水道の雨水管に接続する箇所にて作業員がバケツで流出水を採水し、それぞれ分析に供した。実験中は濁度計によります内の濁度を30秒ごとに計測し、濁度が一定時間(約5分を目安)以上ほとんど変化なしと認められた時点で実験を終了した。なお、流出水を採水する際には、重量法による流量測定も併せて実施した。

水質分析項目はSS、TS、COD、TN、TPである。COD、TN、TPに関しては溶存態も併せて分析した。調査条件の一覧を表-6に示す。

表-6 調査条件一覧

case	ますの種類	想定降雨強度	流入水の種類	浸透量(L/hr)
1-1	雨水ます	10mm/hr	清水(水道水)	—
1-2		30mm/hr	清水(水道水)	—
1-3		10mm/hr	濁水	—
1-4		30mm/hr	濁水	—
2-1	浸透ます	10mm/hr	清水(水道水)	243
2-2		30mm/hr	清水(水道水)	1355
2-3		10mm/hr	濁水	592
2-4		30mm/hr	濁水	985

備考1: 「想定降雨強度」は、流入水量の目安であり厳密な流量ではない。ます1個の集水面積を20×3=60m²と設定した。
備考2: 「浸透量」は浸透ますから水が流出する間の浸透水量(流入水量と流出水量の差)から算出した。

4. 2 実験結果

(1) 流出負荷量の経時変化

流出実験結果の一例として、想定降雨強度10mm/hrの4ケースにおける流量及びCOD負荷量の経時変化を**図-2**に示す。case1-1(清水、雨水ます)では、時間経過とともに流出負荷量が減

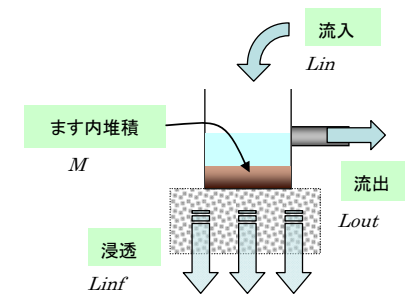


図-2 雨水浸透ます実験の概要



写真-1 調査の様子

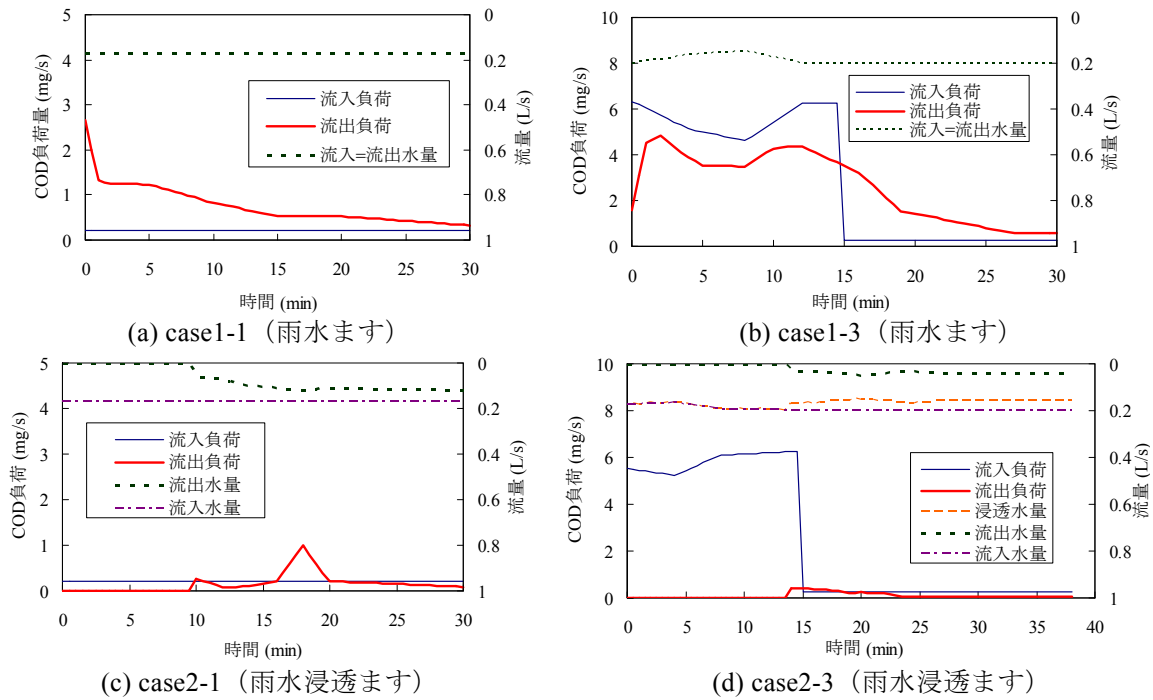


図-2 COD 負荷量と流量の経時変化

少し、流入負荷量に漸近した。これは、注水初期にます内の堆積物が巻き上げられるものの、一定流量の下で巻き上がる堆積物量が次第に減少したためと考えられる。また、case2-1 (清水、雨水浸透ます) では、実験開始後およそ 10 分間流入水の全量が浸透したため汚濁負荷の流出はなかった。流出した後の流出負荷量は、流入負荷量と概ね同程度で推移した。

一方、濁水を用いた実験 case1-3 (雨水ます) では、実験初期に上澄み液の流出があったため流出負荷量が比較的小さな値を示したが、その後はほぼ流入負荷量に追従した形で推移した。流入水が清水に切り替わる (実験開始から約 15 分) 前は、流入負荷量が流出負荷量を上回っており、雨水ますが COD 負荷を捕捉していたことが示唆される。case2-3 では、濁水が流入していた間ほとんどの水が浸透し、ますから流出が開始した後も流出負荷量は流入負荷量とほぼ同程度の値であった。

(2) 汚濁物質の削減効果

雨水ます及び雨水浸透ますが有する汚濁物質の削減効果は、次に定義する汚濁負荷削減率により評価した。

$$(\text{汚濁負荷削減率}) = (\text{総流入負荷量} - \text{総流出負荷量}) / (\text{総流入負荷量}) \quad (\text{式 2})$$

削減率の一覧を表-7 に示す。雨水ますにおいて、流出負荷量が流入負荷量を上回ったため負の値となる傾向にあった一方、雨水浸透ますでは概ね正の値となり、汚濁物質が雨水浸透ますにより捕捉されている結果となった。特に、濁水を用いた case2-3、2-4 においては、例えば COD で 90%以上を示すなどすべての水質項目で高い値とな

表-7 汚濁負荷の削減率

case	ますの種類	想定降雨強度	流入水の種類	COD	D-COD	TN	D-TN	TP	D-TP	SS	TS
1-1	雨水ます	10mm/hr	清水	-263.6	6.9	21.9	28.2	-81.7	-26.7	-	14.1
1-2		30mm/hr	清水	-70.9	15.3	30.2	33.4	-15.0	-1.7	-	23.7
1-3		10mm/hr	濁水	6.4	-48.8	-2.2	14.8	-85.7	-332.2	-138.8	0.1
1-4		30mm/hr	濁水	-105.2	-44.2	-24.7	21.1	-77.0	-61.0	-174.7	8.0
2-1	浸透ます	10mm/hr	清水	21.7	76.9	71.2	71.4	66.6	50.5	-	63.5
2-2		30mm/hr	清水	-5.9	81.1	76.2	76.9	-112.2	64.9	-	67.8
2-3		10mm/hr	濁水	96.5	91.2	92.0	90.7	95.3	85.0	94.8	92.8
2-4		30mm/hr	濁水	91.0	79.1	82.9	79.6	89.9	63.0	87.4	78.8

備考: 「-」は、流入負荷量がゼロであったため、削減率を計算できなかったことを示す。

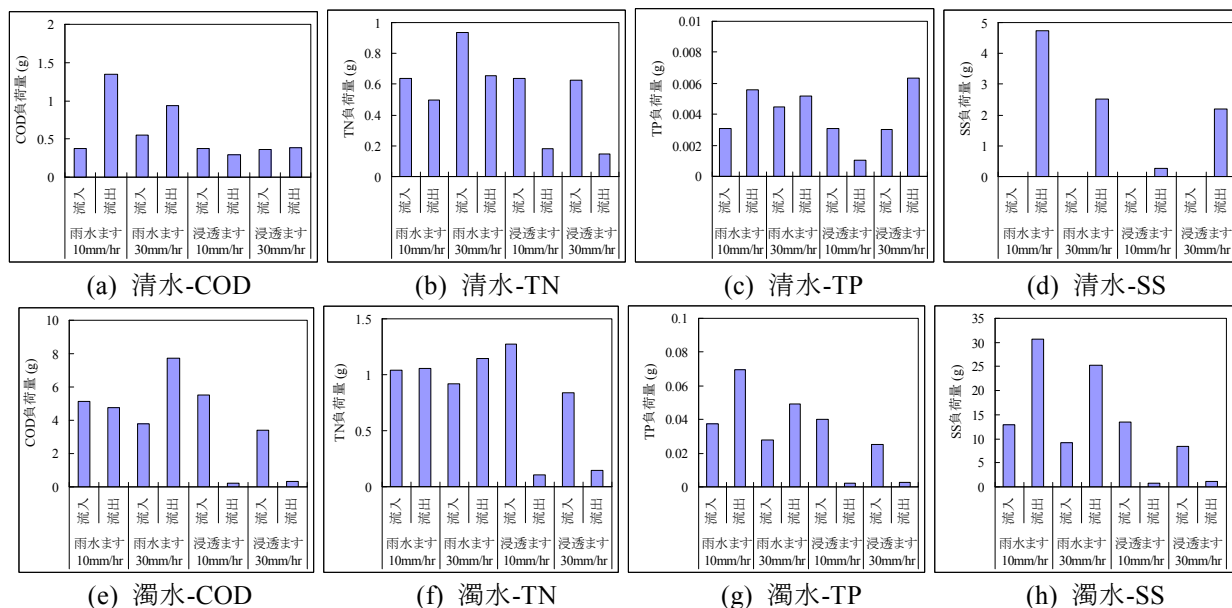


図-3 流入・流出負荷量の比較

った。清水実験（想定降雨 30mm/hr）の case2-2 では、COD と TP で負の値となったが、これは、流量が大きいため雨水浸透ますの堆積物の巻き上げが大きくなり、結果として流出負荷量が卓越した可能性がある。水質項目別では、TN、D-TN（溶存態 TN）、TS が雨水浸透ますのみならず雨水ますでも捕捉される傾向にあった。

5. おわりに

本調査で得られた知見を以下に整理し、併せて今後の展望について若干述べる。

- ・ 雨天時に市街地から流出する雨水は、環境基準や生態系に影響を与えかねない濃度を上回る傾向にあり、その負荷量は排水区の間で大きく異なった。
- ・ 市街地からの流出負荷量を把握する手段として、重回帰式による予測の可能性を提示した。
- ・ 雨水ますは、ます内に堆積する汚濁物の巻き上げなどの作用で、市街地における汚濁源となりうる。
- ・ 一方で、本調査の対象とした雨水浸透ますは、高い割合で汚濁物質を捕捉する能力を有していた。

今回実施した雨水浸透ますの実験においては、雨水ますまたは雨水浸透ます内に堆積する負荷量及び地中に浸透する負荷量を定量的に把握していないので、ます内部の汚濁物質の挙動や、堆積物が流出負荷量に与える影響など、詳細なメカニズムの解明を解明するに至っていない。今後は雨水浸透ます内のメカニズムを明らかにしていくことで、雨水浸透ますを下水道計画に位置付けることが可能になるものと考えられる。

市街地におけるノンポイント負荷対策は、2. のアンケート調査のとおり、現状では実施事例が少なく試行錯誤の状態にある。今後も雨水浸透などを中心に、効果的なノンポイント負荷対策につき調査を進める予定である。

謝辞

本調査に対して調査フィールドをご提供いただいた自治体の関係各位に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、国土技術政策総合研究所下水道研究部：市街地ノンポイント負荷対策の手引き（案）、2007（印刷中）
- 2) 藤生和也、吉田敏章、田本典秀：雨天時における路面排水負荷対策に関する調査、平成 17 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料第 323 号、pp.15-18、2006