

論 文

非特定汚濁源の把握と削減に関する研究（その1） — 合流式下水道の雨水吐き室の流出汚濁負荷量 —

嶋 津 暉 之 木 村 賢 史 三 好 康 彦
紺 野 良 子

要 旨

下水道が普及したにもかかわらず、水質がいまだ十分に改善されていない河川が多い。この下水道普及河川の汚濁要因の一つとして、雨天時における合流式下水道雨水吐き室からの汚水混合雨水の放流がある。この汚濁負荷量を把握し、その削減対策を検討するため、多摩川支流仙川の流域にある合流式下水道の雨水吐き室に流量計測装置と自動採水器を設置して、越流水の汚濁負荷量を計測した。その結果、①雨水吐き室越流水のBOD、COD、T-Pの95%水質値は家庭汚水平均水質の0.8~1.1倍、平均値は家庭汚水の0.3~0.4倍であること、②一回の降雨による越流水の汚濁負荷量は対象地区の発生汚濁負荷量と同程度になる場合があること、③一日平均流出汚濁負荷量は下水処理場の放流負荷量の5割程度に相当することなどが明らかとなった。

1 はじめに

東京都内の下水道普及率は毎年約2%上昇し、平成2年度末で区部93%、多摩地区78%で、都全体では88%になっている。それにより、東京の河川の水質は昭和40年代と比べてかなり改善されてきたが、しかし、その水質は下水道の普及率の数字ほど向上していない。その原因の一つとして、雨天時における合流式下水道の雨水吐き室等からの汚水混合雨水の放流がある。汚水と雨水を同じ下水管で流す合流式下水道では、雨天時に流量が増大した時は、下水管の途中にある雨水吐き室や雨水ポンプ所から、処理場の処理能力を超える分が直接、河川等に放流される（台地部は雨水吐き室、低地部は雨水ポンプ所）。合流式下水道が計画された当時は、下水が雨水によって十分に希釈されて雨水吐き室等から放流されるので、その放流水の水質濃度はさほど高くなることはないと考えられていたが、実際には希釈された下水だけが放流されるのではない。下水管の底部に堆積した汚濁物が雨天時の流量増大時に洗い流され、放流水に混入する。そのため、放流水の水質濃度が上昇し、河川等の汚濁源になることがある。

東京都内の下水道は面積比率では区部の約85%、多摩地区の38%（普及人口比率では41%）が合流式となって

おり、都内河川等の水質改善をはかるためには、雨水吐き室等からの越流水の汚濁負荷量がどの程度のものであるかを明らかにし、その削減の対策を検討する必要がある。

今回、多摩川支流仙川の流域にある三鷹市下水道の雨水吐き室2カ所に計測装置を設置して、その越流水の汚濁負荷量を計測した。その計測と解析の結果を報告する。

2 方法

(1) 計測の対象

仙川流域の三鷹市下水道の処理面積は約720haである。そのうち、合流式が約620haで、雨水吐き室が仙川に面して十数カ所設置されている。今回、計測の対象にしたのは図1に示すA地区とB地区であり、それぞれの処理面積は約14haと21haである。町丁別の人口密度を使って処理人口を推定すると、それぞれ約1,700人と3,700人である。A地区の雨水吐き室の遮集下水（越流しなかった下水）は汚水管を流れ、処理場へ送られているが、一方、B地区の遮集下水は幹線の合流管に流入する。この幹線の合流管の雨水吐き室は約3km下流に設置されており、B地区の雨水吐き室は前段の役目を担っている。

(2) 計測の方法

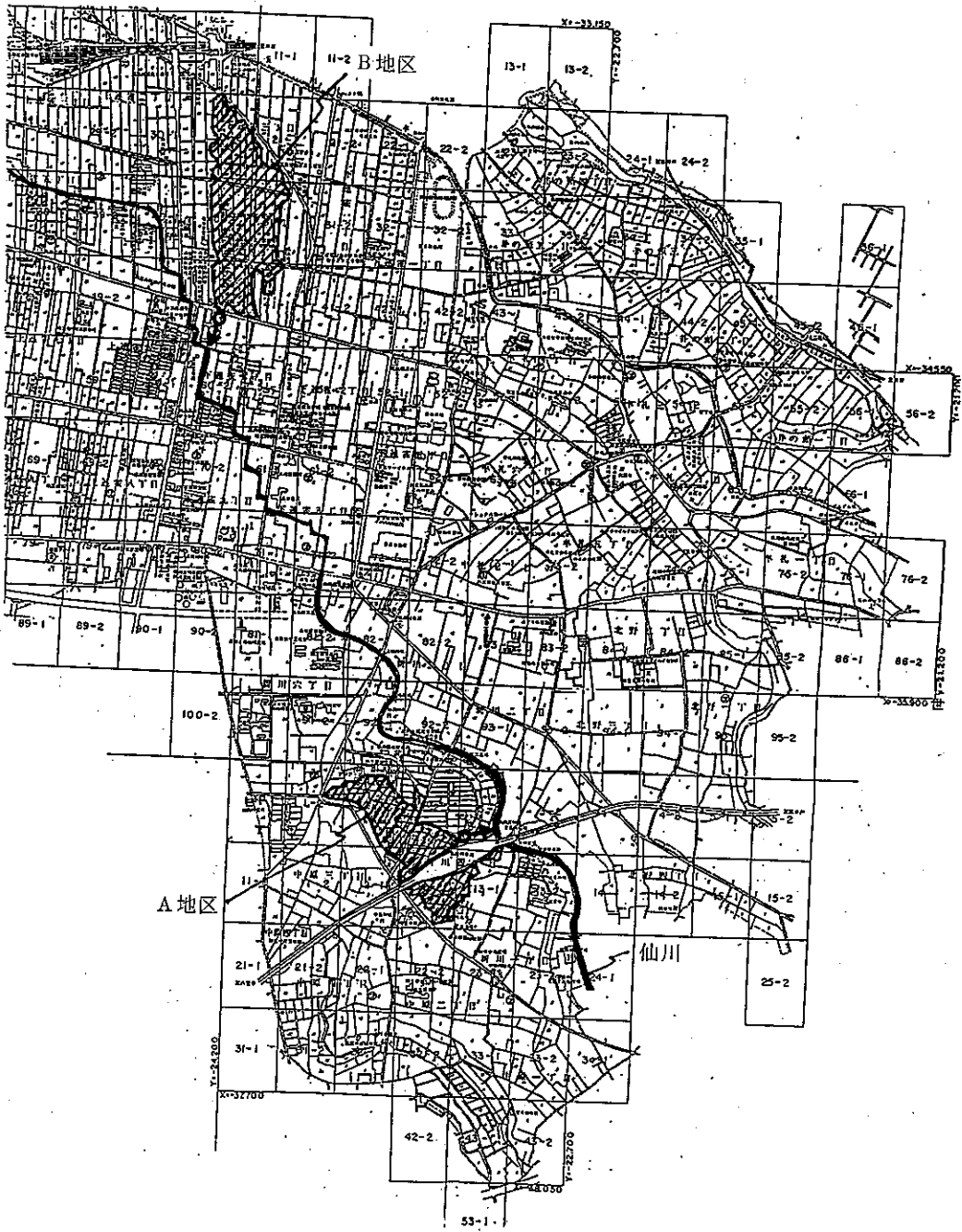


図1 調査対象地区 (三鷹市東部)

雨水吐き室越流水の下水管に流量計測装置と自動採水器を設置して、越流水の流量を計測するとともに、越流水を採取してその水質を分析した。図2に示すとおり、下水管の底部に流量計測装置のセンサーと自動採水器の採水ストレーナーを取り付け、流量計測装置と自動採水器の本体はマンホール直下にぶらさげておく。流量計測装置は、設定した時間間隔（今回は15分）で越流水の流量を（流れがない時も含めて）連続的に計測する。雨が大量に降り、設定流量（今回は10～50 m^3 ）に達すれば、計測装置から自動採水器に対して指示が出て1回の採水が行われる。自動採水器の採水可能本数は24本である。採水が行われたと判断されるほどの雨が降った後、現場に起き、採水器の中の検体を回収するとともに、計測装置に記憶されている流量データを携帯用コンピューターに転送する。

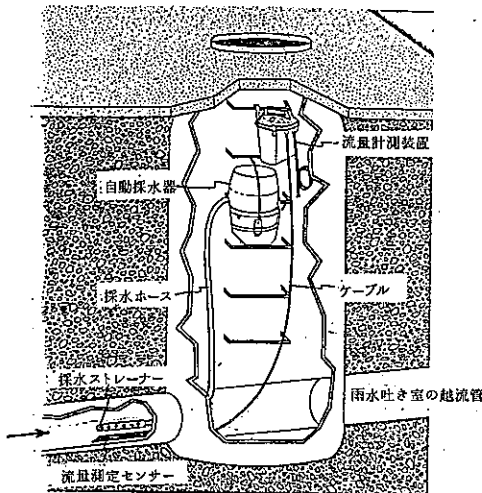


図2 計測装置の設置状況（マンホール内部）

今回用いた流量計測装置はエヌケーエス株のQロガーシステムである。越流水の水位は半導体圧力式センサーで測定され、その水位からマンニングの公式により流量が求められる。

なお、雨量は東京管区気象台の府中地点における時間別観測降水量を用いた。

(3) 計測の期間

A地点は1990年10月～91年2月、B地点は91年6～8月である。ただし、自動採水器の採水本数の上限が24本であること、また、機器のトラブルもあったことにより、

期間中の越流水の全部を採水することはできなかった。採水できた検体数はA地点が98本、B地点が60本である。

(4) 分析項目

自動採水器から回収した検体について分析した項目は生物学的酸素要求量 (BOD)、化学的酸素要求量 (COD)、浮遊物質 (SS)、全窒素 (T-N)、溶解性全窒素 (TND)、アンモニア性窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸・硝酸性窒素 ($\text{NO}_x\text{-N}$)、全りん (T-P)、溶解性全りん (TDP)、リン酸態りん ($\text{PO}_4\text{-P}$)、銅 (Cu)、鉛 (Pb)、亜鉛 (Zn)、カドミウム (Cd)、クロム (Cr)、溶解性鉄 (Fe)、溶解性マンガン (Mn) である。

3 結果と考察

(1) 雨水吐き室の流出特性

図3にA地区における降水量と越流量の関係を示す。初期の降水量1mm/時の状態では雨水吐き室からの越流は起きず、2～3mm/時になってから越流量が生じており、降水量と越流量の対応がよく見られる。しかし、降雨が継続すると、1mm/時の降雨でも越流するようになり、降水量と越流量との関係は表面土壌の保湿状態等により左右され、必ずしも一様ではない。

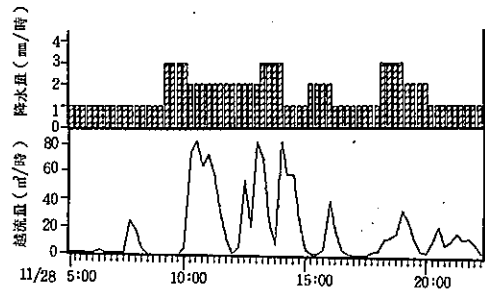


図3 降水量と越流量の関係（例）

1時間前の降水量、あるいは2時間前からの平均降水量など、降水量の取り方をいろいろ変えて、A地区の越流量と降水量の統計的な関係を調べたところ、2時間前からの平均降水量を用いた帰帰式の相関係数が最も高く、0.79の値が得られた（桁の大きい数字の影響を排除するため、降水量10mm/時以上のデータを除いた場合）。越流量を処理面積で割ってmm/時の単位で表すと、 $Y = 0.34(X - 0.63)$ の関係であった（Y：越流量、X：降

水量)。その相関図を図4上段に示す。この式は越流開始降水量が0.63mm/時であることと、雨水の流出率が34%であることを示しているが、前者の推定の精度は低い(95%信頼区間はそれぞれ±2.4mm/時, ±2%)。

一般に合流式下水道は時間最大汚水量の3倍までは遮集して処理場へ送り、それを越える水量は雨水吐き室から河川等へ放流するように計画されている(区部は2~3倍)。一人一日排水量を250ℓ, 日最大排水量/日平均排水量を1/0.7, 時間最大排水量/日最大排水量を1.8/24時とすれば, A地区の遮集最大水量は1,700人×250ℓ×1/0.7×1.8/24×3=135m³/時となる。このうちの1/3を汚水, 2/3を雨水由来として, 90m³/時を処理面積と上述の流出率0.34で割ると, 計画上の越流開始降水量は約2mm/時となる。

一方, B地区は図4下段に示すとおり, 降水量と越流量の関係がかなり異なっている。2時間前からの平均降水量が4mm程度までは越流がほとんど生じないことが多く, 5mm以上の降雨でもA地区に比べて越流量がかなり小さい。B地区の雨水吐き室は2(1)で述べたように前段的な役割を担うもので, 幹線の合流管に遮集できない分を越流させる。その役割を反映して, 降水量が或る程度大きくなると, 越流が生じないようにになっている。

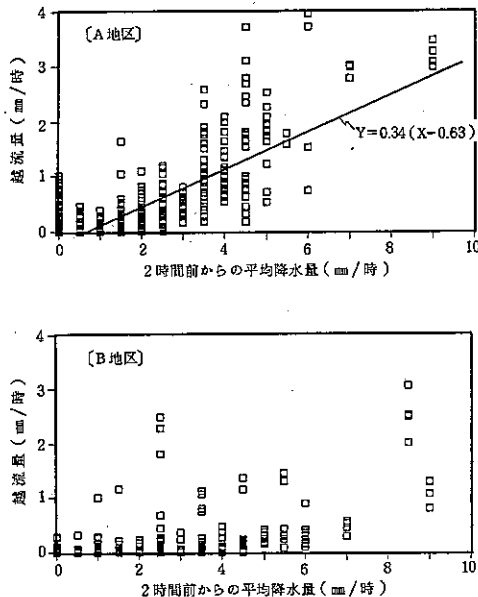


図4 降水量と越流量の相関図

この特徴は(2)に述べるようにその越流水の水質にも反映している。

(2) 越流水の水質

ア 水質の平均値と分布

A地区およびB地区の雨水吐き室越流水の水質を分析した結果を表1に示す。平均値は単純平均と越流量による加重平均の両方を示した。A地区のBODは95%水質

表1 雨水吐き室越流水の水質

(1) A地区		(単位mg/ℓ)			
	95%水質値	5%水質値	単純平均値	加重平均値	[参]家庭汚水の平均
BOD	150	6.7	54	51	190
COD	110	9.2	43	40	100
SS	400	14	130	150	170
T-N	14	2.7	7.3	6.8	37
TDN	7.5	1.7	3.6	3.1	—
NH ₄ -N	4.2	0.41	1.7	1.6	—
NO _x -N	1.9	0.02	0.72	0.69	—
T-P	4.0	0.21	1.4	1.0	3.5
TDP	3.4	0.02	0.47	0.15	—
PO ₄ -P	1.9	0.01	0.31	0.10	—
					排水基準
Cu	0.5	<0.1	0.1	0.1	3
Pb	0.2	<0.1	0.04	0.05	1
Zn	2.1	<0.1	0.8	1.0	5
Cd	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1
Cr	0.6	<0.1	0.1	0.1	2
溶解性Fe	0.3	<0.1	0.15	0.16	10
溶解性Mn	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	10

(2) B地区		(単位mg/ℓ)		
	95%水質値	5%水質値	単純平均値	加重平均値
BOD	81	1.6	32	26
COD	71	1.6	24	22
SS	250	<1	80	120
T-N	13	2.7	6.0	4.7
NH ₄ -N	4.0	0.09	1.8	1.3
NO _x -N	2.1	0.04	0.95	0.61
T-P	1.9	0.11	0.76	0.74
PO ₄ -P	0.49	0.05	0.15	0.09

値（測定値を小さい方から並べて95%の順位になる値）が150mg/ℓであり、家庭汚水の平均BODを190mg/ℓとすれば、その約0.8倍になる。平均値は単純、加重とも、50mg/ℓ強であり、家庭汚水平均の0.3倍である。このBODの頻度分布は図5に示すとおりで、100mg/ℓを超える検体の割合は14%であった。

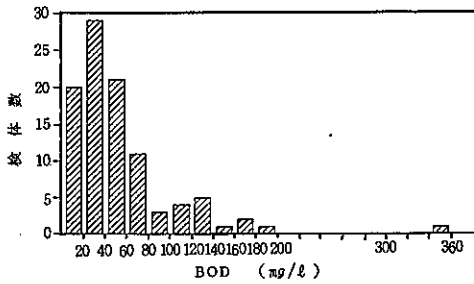


図5 越流水BODの頻度分布 (A地区)

同様に、A地区の各水質項目について家庭汚水の平均水質（表1右欄参照）との比を求めると、95%水質値はCODが1.1倍、SSが2.4倍、T-Nが0.4倍、T-Pが1.1倍、加重平均値はCODが0.4倍、SSが0.9倍、T-Nが0.2倍、T-Pが0.3倍であり、この倍率はBODに比して、SSが大きく、T-Nが小さい。CODとT-PはBODと同程度である。

A地区のCu、Pb、Zn、Cd、Cr、溶解性Fe、溶解性Mnの値はかなり低く、いずれも排水基準（下水道への放流基準と同じ）を大幅に下回っており、重金属類については水域の汚染要因にはなっていないと考えられる。

一方、B地区のBODは95%水質値81mg/ℓ、単純平均値32mg/ℓ、加重平均値26mg/ℓであり、A地区と比べると、その1/2程度である。その他の水質項目の値もA地区より低く、COD、T-N、T-Pの加重平均値はA地区の6～7割である。これは、B地区の雨水吐き室の場合、多少の降雨では越流せず、管底部の堆積物が幹線の合流管へかなり流出した後、越流が生じるからであると考えられる。SSの加重平均値はA地区の8割程度で、他の項目ほど小さくないが、これはA地区に比べて土砂の混入比率が高いことによる。このように、B地区は前段的な役割をもつ雨水吐き室の特徴を反映し、越流量、越流水質とも標準的な雨水吐き室のデータを示していないと考えられる。よって、以下の検討では、A地区の計測データを用いることにする。

イ 水質項目間の相関

A地区の各水質項目の回帰式を表2に、相関図を図6

表2 水質項目間の相関 (A地区)

(1) SSを説明変数とする回帰式

被説明変数	回 帰 式	相関係数
BOD	$Y = 0.36X + 8.6$	0.93
COD	$Y = 0.26X + 9.9$	0.93
T-N	$Y = 0.03X + 3.6$	0.87
T-P	$Y = 0.006X + 0.21$	0.95

(2) BODを説明変数とする回帰式

被説明変数	回 帰 式	相関係数
COD	$Y = 0.7X + 5.1$	0.96
T-N	$Y = 0.076X + 3.3$	0.85
T-P	$Y = 0.015X + 0.24$	0.95

(X、Yの単位 mg/ℓ)

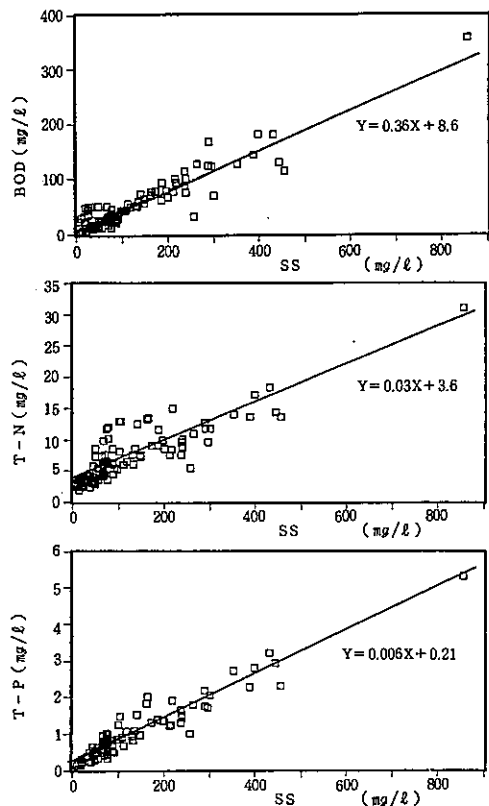


図6 水質項目間の相関図 (A地区)

に示す。回帰式はSSまたはBODを説明変数、その他の水質項目を被説明変数とした。SSとの回帰式は、BOD、COD、T-N、T-Pとも、Y切片の値が比較的小さく、SSとはほぼ比例的な関係にある。相関係数も0.9前後であり、SSの値に対応してこれら4項目の値が変動している。これは合流式下水管の管底堆積物が流量増加時に洗い流され、その堆積物の混入度で越流水の水質がきまることを示している。

BODとその他の水質項目との間の回帰式もY切片の値が小さく、ほぼ比例的な関係にある。その回帰係数はCODが0.70、SSが2.8、T-Nが0.076、T-Pが0.015である。家庭污水におけるBODとの平均的な比はCODが0.5、SSが0.9、T-Nが0.2、T-Pが0.02である。これと比較すると、越流水は土砂堆積物も含むため、BODに対するSSの比が家庭污水の3倍もあるが、BODとT-Nの比はその4割にとどまっている。また、BODとCOD、BODとT-Pの比は家庭污水と大差がない。以上が管底堆積物の性状を表している。

ウ 水質変化の支配要因

アで見たように、雨水吐き室越流水のBOD等の値は大きく変化する。変化の幅は100倍以上になる。図7に越流量とBODの経時変化の例を示す。この例では越流量が小さい初期の2時間はBODが50mg/ℓ程度であるが、2時間半後に越流量が増大すると、BODが180mg/ℓ以上まで上昇している。その後も大きな越流量が続くが、3時間半～6時間後にはBODが50～120mg/ℓの間に低下する。ただし、その間も越流量が増加した時はBODが上昇する傾向が見られる。

図7は大きな降雨が約40日間なかった後の連続的な降雨の場合であり、降雨前の合流管の管底には汚濁物が少なからず堆積していたと推測される。連続的な降雨による流量の増大で、この堆積物が流出したが、その流出の度合は流量の大きさが影響し、流量が小さい状態ではあまり流出しなかった。そして、大きな流量が続いて堆積物が流出し続けると、合流管の通過水に混入する堆積物が次第に少なくなっていった。図7の経時変化はこのような堆積物の流動の変化があったことを示している。

このことから、越流水の水質を左右する基本的な要因が二つあることが分かる。一つはその直前までの合流管通過流量の累積値であり、もう一つはその時点の通過流量の大きさである。前者は管底の堆積物がどの程度残っ

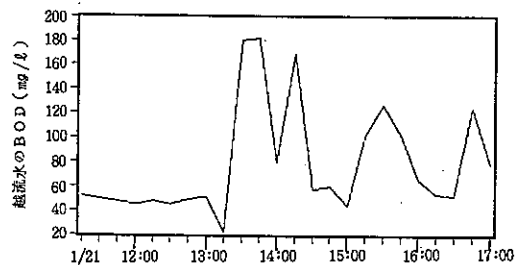
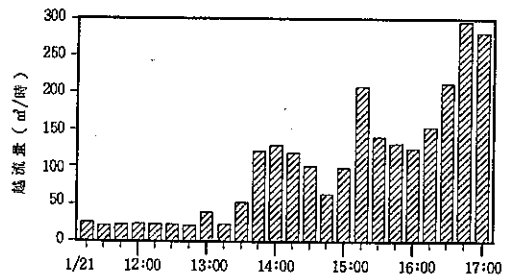


図7 越流量とBOD濃度の経時変化(例)

ているかを示し、後者はその時点の堆積物の流出の度合いを示す。合流管の通過流量は雨水吐き室越流量と一定の関係にあるので、ここでは、通過流量を越流量に読み変えて、過去2日間の直前までの越流量の累積値(X)とその時点の越流量(Y)の関数で越流水のBOD濃度(Z)を表すことを試みた。その結果、図8に示すとおり、相関係数0.55で $Z=42 \log(Y/X) + 92$ の式が得られた。この式からも越流水のBODが上記二つの要因に影響されていることが明らかである。

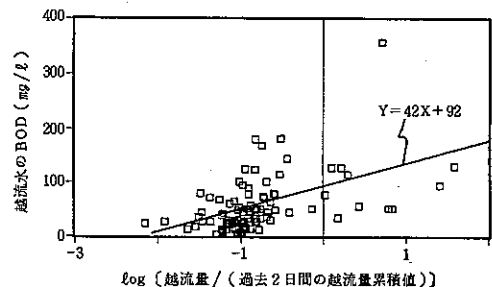


図8 越流量とBOD濃度の関係(A地区)

(3) 流出負荷量

ア BODの流出負荷量

A地区において、雨がほぼ連続して降り、20以上の検体を採水できた期間における越流量とBOD負荷量の累積値の経時変化を図9、10に示す。図9の12月の例では越流が7.5時間続き、そのうち、最初の5時間の越流水が15分おきに採取された。BOD負荷量の累積値は5時間で70kgであった(表3)。越流量の累積値は5時間で1,600 m³、最終の7.5時間で1,750 m³であるから、この降雨による流出負荷量の合計値は70kg台であると推定される。A地区の人口から推定されるBOD発生負荷量は81kg/日であるから(一人あたり排水量を250 l/日、汚水の濃度として表1右欄の値を用いた場合)、この降雨では一日の発生負荷量に相当するBOD負荷量が雨水吐き室から放流されている。

同様に、図10の1月の例では14時間の越流が続き、最初の6時間の越流水が15分おきに採取された。6時間の流出負荷量の累積値は56kgであった。越流量の累積値は6時間で610 m³、14時間で1,600 m³であるから、この場合も雨水吐き室からのBOD流出負荷量の合計値は一日の発生負荷量に匹敵すると考えられる。

このように、長時間、雨が降った時の雨水吐き室の

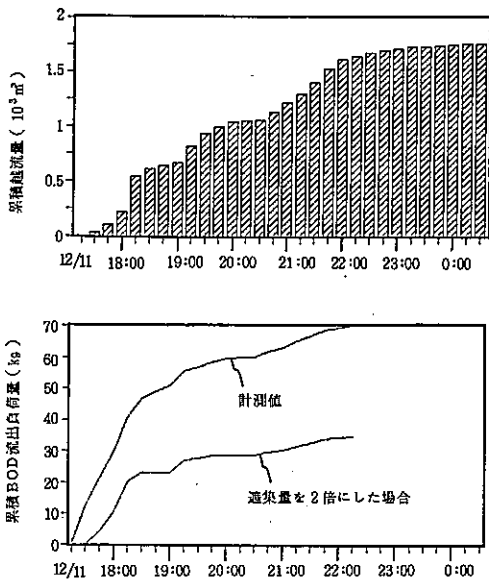


図9 累積BOD流出負荷量の経時変化 (A地区12月)

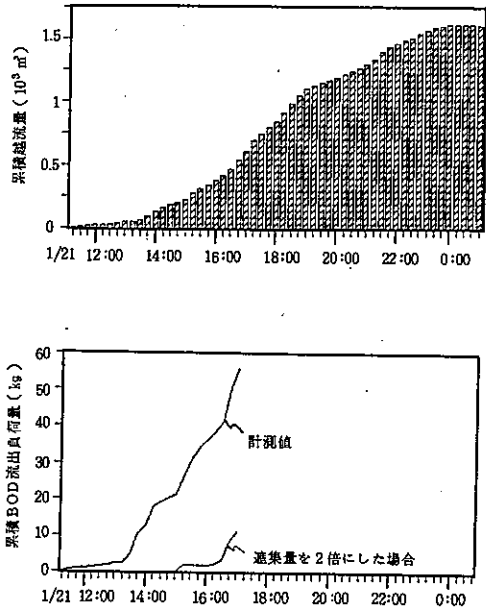


図10 累積BOD流出負荷量の経時変化 (A地区1月)

BOD流出負荷量は発生負荷量と同程度となり、河川等に対する汚濁寄与の割合は決して小さくはない。

12月と1月に長時間降った雨は上記の二回だけであり、この二回の流出負荷量が2カ月間の全流出負荷量のほとんどを占めている。二回とも流出負荷量が70kgであるとすれば、2カ月間の合計流出負荷量は140kg程度となり、一日平均で2.3kgになる。これは一日のBOD発生負荷量の3%に相当する。

下水処理場から晴天日に放流されているA地区の人口分のBOD負荷量を推定すると、4.3kg/日である(一人あたり排水量を250 l/日、下水処理場の処理水BODを10mg/lとした場合)。したがって、雨水吐き室からの平均流出負荷量はその5割強に当たる。下水処理場放流水の汚濁負荷量の半分以上に相当するBODが雨水吐き室から排出されていることになる。

イ COD, T-N, T-Pの流出負荷量

BODと同様に、連続した降雨があった12月、1月のCOD, T-N, T-Pの累積流出負荷量を求めた結果を表3に示す。A地区の発生負荷量に対する雨水吐き室の流出負荷量の割合はCODが0.8~1.4倍以上、T-Nが0.3~0.6倍以上、T-Pが0.6~0.9倍以上である。

表3 雨水吐き室からの流出汚濁負荷量
(A地区の計測分)

	12月11日 (kg)	1月21日 (kg)	発生負荷量 の推定値 (kg/日)
BOD 負荷量	70	56	81
COD 負荷量	60	34	43
T-N 負荷量	9.9	5.4	16
T-P 負荷量	1.33	0.92	1.5

(4) 流出負荷量削減の方法についての検討

雨水吐き室からの流出汚濁負荷量の削減対策として現在、検討され、一部で実施されている方法は、①遮集水量の増加、②雨水貯留槽の設置、③スワール分水槽の設置などである。今回得られたデータを用いて、①と②の方法の有効性について若干の検討を行ってみる。

まず、①については現状では時間最大汚水量の3倍流量までが遮集され、下水処理場へ送られるようになっている。英国等ではこの遮集倍率を倍増させることが勧告されている。しかし、遮集倍率の増加は下水処理場までの下水管きよを敷設し直すことだけで対応できる問題ではない。現在、雨天時に処理場へ流れ込んだ3倍流量の下水のうち、2倍流量分は最初沈殿池だけの処理で放流されている。単なる遮集水量の増加はこの簡易処理水量を増加させるだけであるから、処理場の施設改善も同時に進める必要がある。このような問題はあるが、A地区の雨水吐き室において遮集水量を現状の2倍、すなわち、時間最大汚水量の6倍まで増加させた場合（現在の越流量のうち、135ml/時を新たに削減した場合）、越流水のBOD流出負荷量がどの程度減少するかの試算を行った。その結果を前出の図9、10に示す。12月の例では5時間の累積負荷量は改善前の50%、1月の例では6時間の累積負荷量が20%まで減少した。1月のような越流のパターンの場合は遮集水量の倍増は負荷量削減の効果が大きいですが、12月のパターンのような場合は半分程度の削減にとどまってしまう。このように遮集水量の増加は雨の降り方によって必ずしも負荷量削減の効果が大きくはない。

前述の②は雨水吐き室の越流水を雨水貯留槽に貯留し、晴天になってからポンプで遮集管に送水するものである。この方法を採用した場合、どの程度の容量の雨水貯留槽が必要となるかが重要である。12月の例ではBOD流出

負荷量70kgは約1,600m³の越流水、1月の例では流出負荷量56kgは約600m³の越流水によるものであった。その後も越流が継続していることから考えれば、総流出負荷量の8～9割を削減するためには、1,600m³または600m³程度の越流水を貯留できる雨水貯留槽を設置する必要がある。水深を5m、貯留槽の形状を正方形とすれば、1,600m³の容量の場合、約20m四方の貯留槽が必要である。雨水貯留槽は必要な容量が得られれば、流出汚濁負荷量の削減効果が大きいですが、A地区の雨水吐き室の近辺でこれだけの面積を確保するのは容易ではない。

以上の検討で明らかのように、雨天時における雨水排水量の急激な増加を前提として、雨水吐き室越流水の汚濁負荷量の削減をはかることはきわめてむずかしい。降水量が増大しても、雨水排水量が急増しないように、雨水の地下浸透の全面的な推進をはかることが流出汚濁負荷量削減の基本的な対策になると考えられるが、その有効性についてはあらためて検討することとしたい。

4 おわりに

多摩川支流仙川の流域にある合流式下水道の雨水吐き室2カ所に流量計測装置と自動採水器を設置して、越流水の流量と汚濁負荷量を計測した。その結果、各雨水吐き室の役割によって越流水の流量や水質が異なったが、標準的なタイプと考えられるA地区雨水吐き室の越流水の傾向は次のとおりであった。

① 雨水吐き室越流水の95%水質値はBOD150mg/ℓ、COD110mg/ℓ、T-N14mg/ℓ、T-P4.0mg/ℓであり、BOD、COD、T-Pは家庭汚水の平均水質の0.8～1.1倍、T-Nは0.4倍であった。

② 越流水の平均水質はBOD51mg/ℓ、COD40mg/ℓ、T-N6.8mg/ℓ、T-P1.0mg/ℓであり、家庭汚水の平均水質の0.2～0.4倍であった。

③ 越流水の重金属の濃度は低く、排水基準を大幅に下回っていた。

④ 一回の降雨による越流水のBOD負荷量は二つの例ではその地区のBOD発生負荷量と同程度であった。また、2カ月間の一日平均流出負荷量は下水処理場の一日放流負荷量の5割程度であった。

⑤ 遮集水量を倍増した場合の汚濁負荷量の削減効果を検討したところ、その効果は越流のパターンによって異なり、50～80%であった。

以上の結果はあくまで約1年だけの調査によるものであり、今後も調査を継続して、雨水吐き室の流出汚濁負荷量の実態を把握し、その削減対策の確立に寄与していくことにしたい。

本調査の実施にあたっては三鷹市建設部下水道課の全面的な協力を得た。ご協力いただいた同課の桑波田昭男維持係長をはじめ、課員の方々に厚く謝意を表したい。また、雨水吐き室からの検体の回収と分析の一部は新日本気象海洋環境分析研究所への委託により行った。マンホール内の作業に従事された同研究所の所員の方々に

も感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 嶋津暉之ら：家庭用合併処理浄化槽の処理水質の向上に関する研究（その3），東京都環境科学研究所年報1991, p.153.
- 2) 横山博一：東京都における合流式下水道の改善，月刊下水道, 14, p.13 (1991).
- 3) 建設省都市局監修：合流式下水道越流水対策と暫定指針，日本下水道協会, p.93 (1982).