

雨天時負荷流出特性と 市街地流域対策に関する研究

CHARACTERISTICS OF RUNOFF POLLUTION AND MEASURES IN AN URBAN CATCHMENT AREA

尾崎 平¹・石垣泰輔²・戸田圭一³
Taira OZAKI, Taisuke ISHIGAKI and Keiichi TODA

¹正会員 修士(工学) 関西大学・助教 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²正会員 博士(工学) 関西大学・教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

³正会員 Ph.D. 京都大学・教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In recent years, sudden intense rainfalls as the result of massive typhoons affected by global warming or one of heat-island phenomena have been observed frequently in Japan. This study is intended to evaluate the runoff characteristics by short-time rainfall and to estimate the reduction effect of runoff pollutant with the existing storage facility. The study area is urbanized residential area and sewer systems are combined. As a result of simulation, the combined sewer overflow (CSO) volumes vary according to rainfall distribution, even for the same rainfall amount. The BOD loads of CSO differ greatly according to rainfall distribution and dry periods. This study shows the possible application of existing storage facility for reduction of CSO load by short-time rainfall.

Key Words : *nonpoint pollution, water environment, urban runoff, storm-water reservoir*

1. はじめに

近年、公共用水域へ流出する負荷として、下水道整備の進捗に伴い家庭、事業所等の点源からの汚濁負荷量は減少しているものの、都市化の進展に伴う不浸透域の拡大等により路面、屋根等の面源からの汚濁負荷量の割合は増加傾向にある¹⁾。都市域において、合流式下水道からの越流水や分流式下水道からの雨水排水負荷は、水路や河川を経て海域や湖沼へ流出し、水質汚濁や富栄養化の要因のひとつになっている。そのため、面源からの負荷の定量化や削減対策が重要な課題となっている。

これまで都市域における面源負荷に関する調査、研究は多く行われている²⁾が、気象条件等の自然的要因に加え、都市の社会活動に伴う人為的要因が大きく影響し、また面的に広範囲に分布していることから効率的な対策が確立されていないのが現状である³⁾。

市街地からの面源負荷は道路や屋根等の不浸透域に晴天時に堆積したものが降雨により洗い流され、公共用水域に放流される。また、下水道が合流式である場合には汚水と雨水が同一の管きよで流され、ある一定以上の流量になると処理場で処理できなくなることから、未処理

のまま公共用水域へ放流される。わが国において東京や大阪をはじめとする古くから下水道が整備されている大都市域は合流式下水道であり、その割合は下水道人口普及率の約3割にのぼる⁴⁾。

市街地からの雨天時流出特性について、土木研究所等を中心に調査がなされており、ファーストフラッシュ現象やSS、BODの時系列変動に関する基礎的知見が得られている⁵⁾⁶⁾。また、道路排水対策⁷⁾や越流水対策⁸⁾に関する研究がなされており、貯留施設⁹⁾や浸透施設¹⁰⁾による効果の定量化が進められている。また、平成15年に下水道法施行令が改正(原則10年での合流式下水道の改善を義務づけ)され、その対策が推進されている⁴⁾。

しかし、近年では集中豪雨の頻発や短時間の大雨など、雨の降り方もやや変化してきている。そこで本研究ではこれまであまり検討されてこなかった短時間の降雨による負荷流出特性を解析により明らかにすることを試みた。対象地域は合流式下水道が整備されている地域とし、流出特性を評価するためのパラメータは総降雨量、降雨分布、先行晴天日数とした。また、併せて既存の貯留施設を用いた短時間降雨による流出負荷の削減可能性についても評価し、その削減効果についても考察した。

2. 解析モデルとその検証

(1) 解析モデル

本研究における計算モデルは、分布型モデルの一つであるInfoWorks CS (Wallingford Software Limited, U.K.)を用いた¹¹⁾。分布型の解析モデルとは、表面貯留、浸透、地表面流、下水管きょ内流といった雨水流出過程および晴天時堆積負荷、雨天時流出負荷、下水管きょ内汚濁負荷輸送といった汚濁負荷流出過程をプロセス毎に取り扱い、同時に対象流域の土地利用分布状態を考慮できるモデルのことである。入力項目は下水道施設のデータ（マンホール、管きょ及び堰やポンプ等の制御データ等）、流域データ（マンホール毎の集水区域面積と土地利用（屋根面、道路面、浸透面）面積情報等）、地表面流出特性に関するパラメータ値（初期損失や浸透能、負荷堆積速度等）、である。なお、水理計算、汚濁負荷計算の理論式およびパラメータについては既報^{12),13)}にて詳細を示しているためここでは省略する。

(2) 対象地域

対象地域は合流式下水道が整備されている大阪府寝屋川北部流域とした。対象排水区ならびにその模式図を図-1に示す。対象モデル排水区は排水区①(菊水排水区、約196ha)、排水区②(桑才排水区、約830ha)であり、両排水区併せて、屋根面積：402.18ha(39.3%)、道路面積：145.59ha(14.2%)、浸透域477.03(46.5%)である。対象地域の人口は、排水区①が約35,200人、排水区②が約152,200人の合計187,400人である。

本排水区は、主要施設として鴻池水みらいセンター、菊水ポンプ場、桑才ポンプ場、流域幹線、増補幹線がある。排水区からの汚水は、菊水ポンプ場および桑才ポンプ場から鴻池水みらいセンターに汚水ポンプにて送水されている。雨天時には、両ポンプ場の3Q(Q：晴天時時間最大汚水量、菊水ポンプ場：1.047m³/s、桑才ポンプ場：6.144m³/s)までの下水は鴻池水みらいセンターに送水され、1Qまでを高級処理し、1Q～3Q(2Q分)までを簡易処理して放流している。3Q以上の下水は、雨水ポンプにて河川へ未処理のまま放流されている。

(3) 解析モデルの妥当性

晴天時汚水量および負荷量のキャリブレーションは、菊水ポンプ場、桑才ポンプ場において過去に調査された2回のデータをもとに行い、水量、負荷量とも概ね良好な結果が得られた¹³⁾。

雨天時流出水量および負荷量のキャリブレーションについては表-1に示すような降雨規模、先行晴天日数が異なる4降雨を対象に行った。一例を図-2に示す。このケース以外においても水量、水質ともに解析値は実測値を概ね良好に再現できている。この結果より、降雨規模

表-1 キャリブレーション降雨の概要

時間最大雨量(mm/hr)	総降雨量(mm)	降雨継続時間(hr)	先行晴天日数(日)
4.0	33.0	14.3	4.3
3.0	5.5	4.0	11.5
10.5	66.0	24.8	7.6
6.0	83.0	20.8	2.7

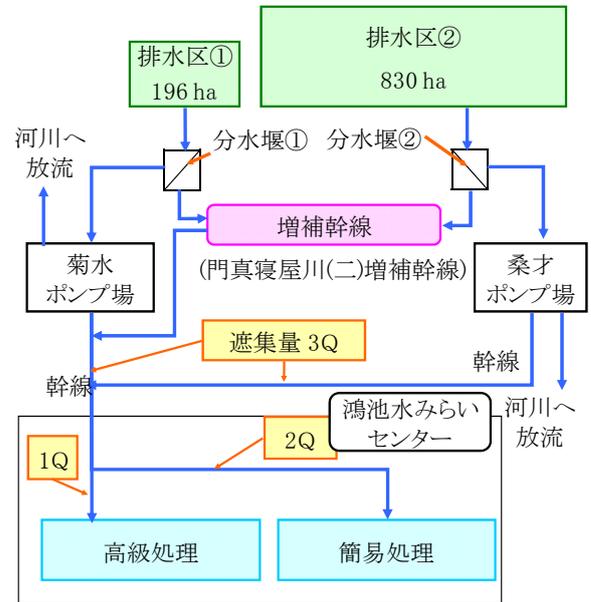


図-1 対象地域の模式図

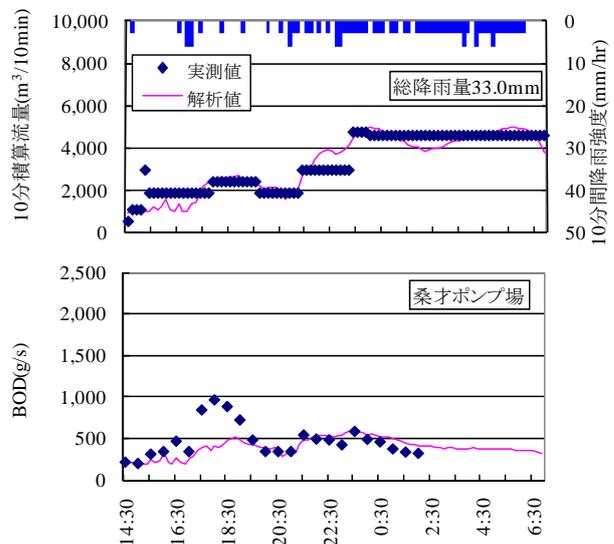


図-2 雨天時流出水量およびBOD負荷量の同定結果(桑才ポンプ場)

や先行晴天日数の異なる条件であっても本モデルを用いることにより評価できることが確認された。

3. 雨天時負荷流出特性

(1) 解析ケース

負荷流出特性の影響要因として、本研究では総降雨量、降雨分布、先行晴天日数を対象とした。ここで先行晴天日数とは降雨イベント間の日数である。雨天時流出負荷の検討を行う場合、一般に総降雨量30mm未満を対象とすることが多い。これは30mm以上の場合には、流出水量が多くなるため、希釈効果が高まるためである。そのため、本研究においても総降雨量30mmまでとし、合流式下水道からの越流現象を評価するために総降雨量10mm、20mm、30mmの3ケースとした。また、降雨継続時間は2時間とし、表-2に示すような降雨分布を設定した。先行晴天日数については、実際の気象現象を踏まえ0~10日間とし、0、2.5、5、10日の4ケースを設定した。以上のように総降雨量3ケース、降雨分布6ケース、先行晴天日数4ケースの72ケースについて貯留施設(増補幹線)がある場合とない場合のそれぞれについて解析を行った。なお、負荷流出特性の評価は貯留施設がない場合における雨天時の未処理放流量、負荷量(各ポンプ場からの河川への直接放流のみ)を対象として行った。また、解析条件として、降雨は対象地域内に一様に降ると仮定し、計算時間は短時間降雨の前後に3時間ずつブランクを入れ、合計8時間とした。

(2) 未処理放流量

水量は、先行晴天日数の違いによる影響がないため、総降雨量と降雨分布の違いによる結果を図-3に示す。ポンプ場から水みらいセンターへ送水される水量には上限(3Q)があるため、総降雨量が多いケースほど未処理放流量は多い。

また、降雨分布についても単位時間当たりの降雨量が多いケースの未処理放流量は多い。特に総降雨量が10mmの場合は降雨分布の違いによる未処理放流量の差は大きく、最大のケース(0-10)と最小のケース(4-6)では、1.7倍程度異なる。一方、総降雨量が20mmおよび30mmのケースでは、降雨分布の違いによる未処理放流量の差は小さく、それぞれ1.1倍、1.06倍程度である。これはポンプ場から水みらいセンターに送水できる水量は一定でかつ上限があることから、流出水量の少ない総降雨量が10mmの場合の降雨分布間の比較では、最大と最小の差が大きく、流出水量の多い総降雨量が30mmの場合の降雨分布間の比較ではその差が小さくなっている。

(3) 未処理放流BOD負荷量

ここでは放流先水域が河川であることから環境基準項目の一つであるBODを評価指標として、流出特性の評価を行った。

表-2 解析ケース

総降雨量	10mm	20mm	30mm
降雨分布 (1時間目(mm)– 2時間目(mm))	0-10	0-20	0-30
	2-8	4-16	6-24
	4-6	8-12	12-18
	5-5	10-10	15-15
	6-4	12-8	18-12
	8-2	16-4	24-6
先行 晴天 日数	0日		
	2.5日		
	5日		
	10日		
貯留施設	あり(With)		
	なし(Without)		

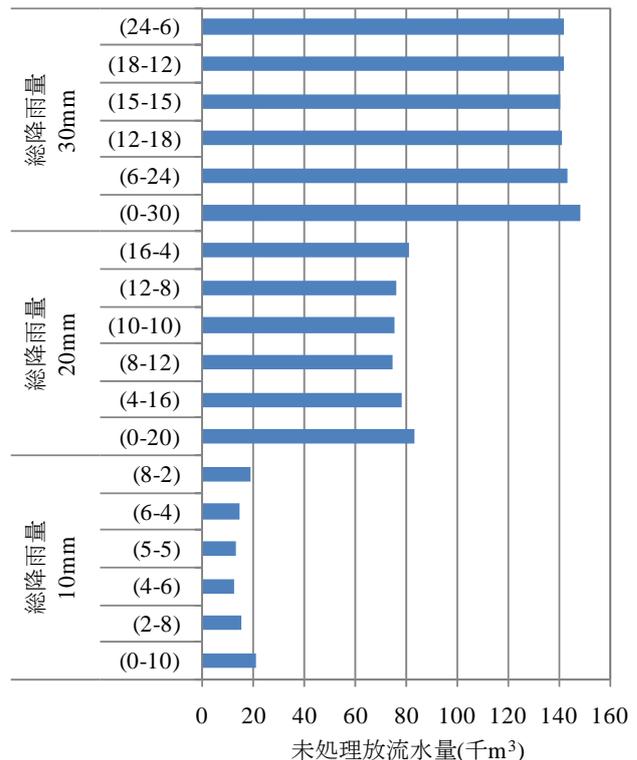


図-3 未処理放流量の比較

各解析ケースにおける未処理放流BOD負荷量の結果を図-4に示す。

a) 総降雨量の違いによる未処理放流BOD負荷量の比較

未処理放流量が図-3に示すとおり、総降雨量によって大きく異なっており、総降雨量が多いほど、未処理放流BOD負荷量も多くなっている。また、未処理放流量、負荷量とも最大のケースにおいて総降雨量間を比較すると、総降雨量30mmの未処理放流量は、20mm、10mmの1.8倍、7.1倍であったが、BOD負荷量は、それぞれ1.2~1.3倍、3.0~3.5倍程度であった。水量に比べ、負荷量の倍率が小さいのは、いずれのケースも流出初期の高濃度の下水が水みらいセンターに送水されること、および流出水量の増加による希釈効果により未処理放流水の濃度は低くなり、負荷量が水量に比例しないため

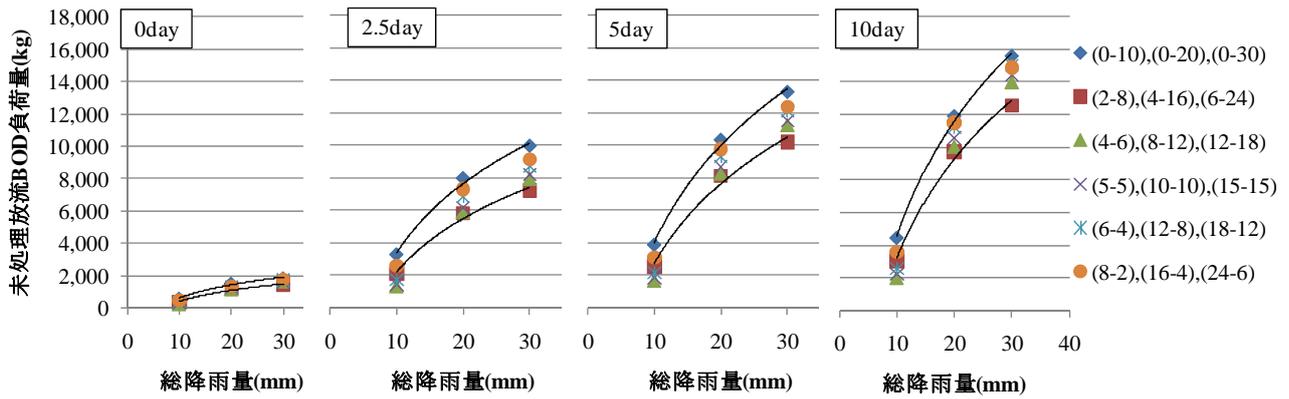


図-4 先行晴天日数毎の未処理放流BOD負荷量と降雨量・降雨分布の関係

ある。

b) 降雨分布の違いによる未処理放流BOD負荷量の比較

降雨分布ケース間の最大値と最小値の比率は、総降雨量10mm, 20mm, 30mmの場合でそれぞれ2.2~2.3倍, 1.2~1.4倍, 1.2~1.4倍である。水量と同様に総降雨量10mmの場合ではその差が大きく、20mm, 30mmの場合ではその差が小さい。総降雨量10mmの降雨分布ケース間の差が大きいのは、汚濁物質を輸送する水量の差が大きいことに加え、汚濁物質の流出プロセスが影響している。路面や屋根面ならびに管きょ内に堆積している負荷は、降雨により浸食され、流出する。総降雨量10mmにおいて、「0-10」のケースは、「4-6」や「5-5」のケースに比べ、降雨強度が強いため、浸食量ならびに流出水量とも多くなり、負荷の輸送量が增大する。一方、総降雨量20mm, 30mmの降雨分布ケースはいずれも降雨強度が強いため、浸食量や負荷の輸送量に差が出にくい。このように総降雨量が同じであっても降雨分布の違いによりBOD負荷量が異なる場合が生じる。

c) 先行晴天日数の違いによる未処理放流BOD負荷量の比較

結果より、先行晴天日数が長くなるほど、未処理放流BOD負荷量は大きくなることが示された。今回の検討ケースのうち、水量、負荷量とも最大となる総降雨量毎のケース（「0-10」、 「0-20」、 「0-30」）に着目した場合、総降雨量によりやや異なるが、先行晴天日数が0日の場合の負荷量と2.5日、5日、10日の負荷量を比較すると、それぞれ約5倍、7倍、8倍である。ここで先行晴天日数0日とは路面や屋根面ならびに下水道管きょ内への堆積物がほとんどない状態（解析時間の8時間のみ）であり、大雨により地表面ならびに管きょの堆積物がフラッシュされた直後の状態である。そのため、先行晴天日数が0日の場合には未処理放流BOD負荷量が少ない。先行晴天日数が増加するに従い、負荷量も増加するが、その増加傾向は対数近似により表現できる。この結果は、管きょ内の堆積負荷が合流式下水道越流水に与える影響が大きいことを示した既往研究による調査結果¹⁴⁾と合致するもの

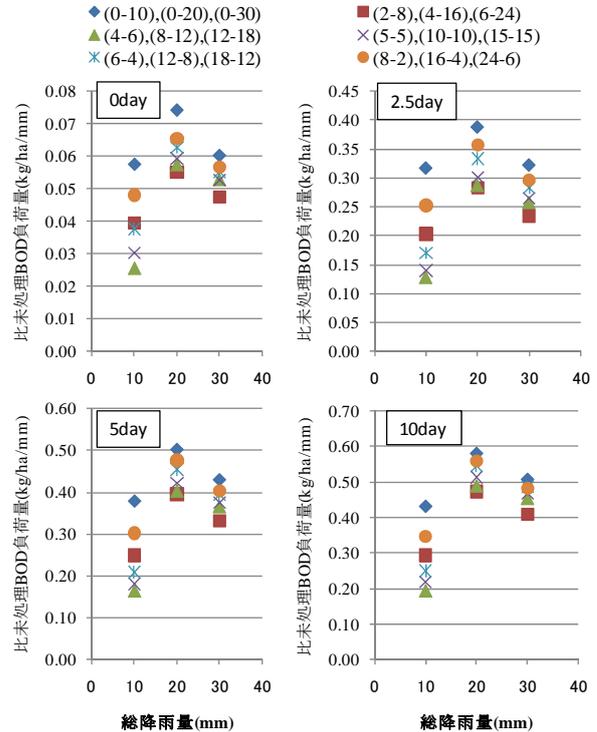
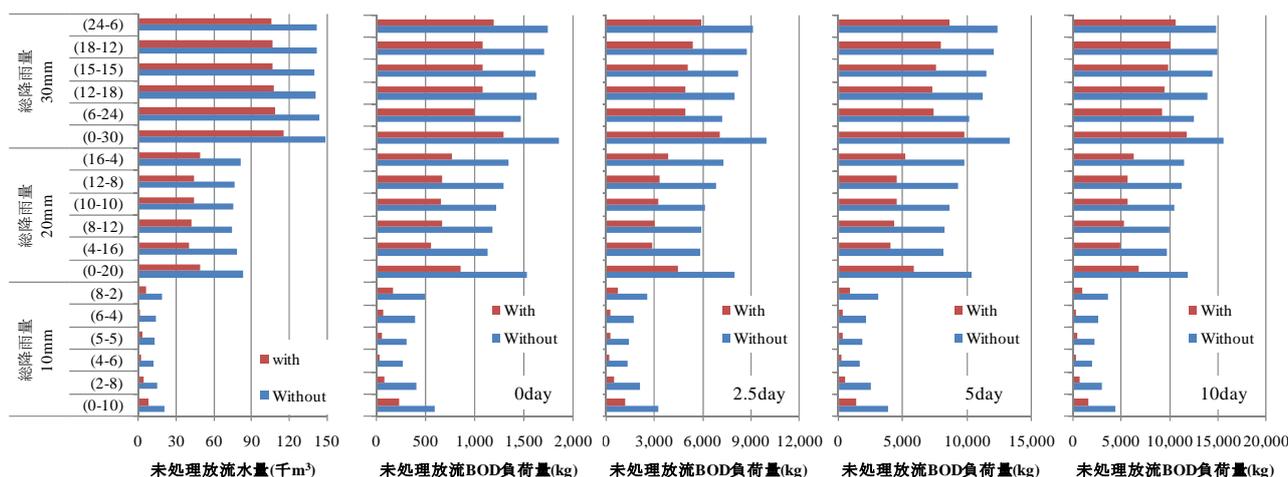


図-5 比未処理放流BOD負荷量の比較

である。

d) 比未処理放流BOD負荷量による考察

次に本検討結果を一般化するために結果を比未処理放流BOD負荷量(kg/ha/mm)で表した(図-5)。ここで比未処理放流BOD負荷量は、放流負荷量を流域面積(ha)、総降雨量(mm)で除したものである。ここで、総降雨量20mmの場合にピークをとる理由について、10mmの場合に小さくなるのは、堆積物の浸食、輸送に必要な掃流力を十分に得られるだけの降雨強度がないためである。一方、30mmの場合に小さくなるのは、希釈効果によるものである。これは汚濁物の堆積状態が同じで、20mm, 30mmともに堆積物の浸食、輸送に必要な掃流力が得られるだけの降雨強度があるため、降雨量当たりで表現すると、結果的に20mmの場合の比未処理放流BOD負荷量



図一六 貯留施設の有無による未処理放流量・BOD負荷量の比較

の方が大きくなる。

以上より、流域管理対策として合流式下水道が整備されている市街地からの汚濁負荷を推定する場合には総降雨量、降雨分布および先行晴天日数により、雨天時の流出負荷量は異なる。そのため、原単位法等による画一的な取り扱いでは、適正に負荷量を推定できない恐れがあるため、目的に応じた解析手法の選択ならびに降雨分布や先行晴天期間の考慮の有無を判断する必要がある。

4. 市街地流域対策効果の定量

(1) 対策施設

本排水区には、浸水対策を主たる目的とした貯留容量 $36,000\text{m}^3$ ($\phi 6,250\text{mm}$, $L=1,132\text{m}$)の増補幹線が整備されている(計画上は流下施設であるが、現在は暫定的に貯留施設として運用)。しかし、浸水対策としての利用は多くても年に十数回程度であることから、施設の付加価値向上、有効利用の観点から渇水期には合流式下水道越流水対策として利用されている。増補幹線への雨水の流入は、排水区①、②の分水地点の特殊人孔に設置された可動式の分水堰により制御が行えるようになっている。浸水対策時には堰高を20Qに固定し、合流式下水道越流水対策時には、初期の高濃度負荷を貯留するために堰高を1Qとして運用がなされている。

これまで増補幹線の貯留施設としての運用方法ならびに効果の定量に際して、年間の実降雨を用いた評価は行ってきた¹³⁾が、気候変動などの影響により増加している短時間の大雨や降雨分布を考慮した検討は行っていない。そこで、本研究では既存施設の活用による短時間降雨の流出負荷の削減可能性について評価した。なお、貯留施設への分水堰高は1Qとし、評価は未処理放流量、負荷量とも削減率(=1-貯留施設がある場合の水量(負荷量)÷貯留施設がない場合の水量(負荷量))を用いた。

(2) 未処理放流量・負荷量の改善効果

貯留施設の有無による未処理放流量、BOD負荷量の比較結果を図一六に示す。

未処理放流量について、いずれのケースにおいて貯留施設により未処理放流量の削減が可能である。総降雨量10mmの場合、削減率が60~90%とその範囲が広く、降雨分布の影響を強く受けることがわかる。それに対し、総降雨量20mm、30mmの場合の削減率はそれぞれ約40~50%、約20~25%であり、降雨分布の影響は小さい。これは貯留施設の施設容量の制約から、今回の施設では時間雨量7mm程度までは貯留できるものの、それを超える場合には貯留できないためである。

また、未処理放流BOD負荷量についても水量とほぼ同様の傾向が見られる。BOD負荷量の改善率は、先行晴天日数によりばらつきはあるものの水量の改善率とほぼ同等か、やや高くなっている。これは堰高を1Qに設定することにより、降雨初期のファーストフラッシュによる負荷を貯留できるためである。

本結果より、既存の貯留施設を活用することにより短時間の大雨による流出負荷も削減可能であることを示した。ただし、貯留容量と降雨分布の関係から、貯留容量を上回るような降雨の場合の改善率は低くなる。そのため、今後の貯留施設の計画、設計に当たっては、今後の気象変動なども考慮し、降雨規模、降雨分布を設定することが重要である。

5. 結論

本研究では合流式下水道が整備された地域を対象に短時間の降雨による負荷流出特性を明らかにし、さらに既存の貯留施設の活用による短時間降雨の流出負荷の削減可能性について評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) ポンプ場での遮集量が一定であるため、流出水量の少ない総降雨量が10mmの場合では、降雨分布の

違いによる未処理放流水量の差（比率）が大きく、一方、流出水量の多い総降雨量が20mmおよび30mmのケースでは、降雨分布の違いによる未処理放流水量の差（比率）は小さかった。

- 2) 本排水区において、総降雨量30mmの未処理放水量は、20mm、10mmの1.8倍、7.1倍であったが、BOD負荷量は、それぞれ1.2～1.3倍、3.0～3.5倍程度であった。このように未処理放水量とBOD負荷量は希釈効果の影響等により比例しない。
- 3) 降雨分布ケース間のBOD負荷量について、水量と同様に総降雨量10mmの場合ではその差（比率）が大きく、20mm、30mmの場合ではその差が小さかった。これは降雨強度によって地表面、管きょ内堆積物の浸食量および流量が異なるためである。
- 4) 総降雨量が同じであっても、先行晴天日数の違いにより未処理放流BOD負荷量が大きく変化することを定量的に示した。
- 5) 貯留施設による未処理放流BOD負荷量の削減率は、水量の削減率とほぼ同等か、やや高くなる。削減率は貯留施設の施設容量の制約を受けるが、既存施設の貯留施設を活用することにより一定の負荷削減効果が得られることを示した。

以上の結果から、今後の気候変動の影響等により、晴天日が長く続いた後の短時間豪雨のような気象パターンが多発する場合には雨天時の公共用水域への汚濁負荷は増大することになるため、貯留、浸透も含めた流域での対応がますます重要になってくる。また、流域管理のための計画、対策の立案には、流出負荷に影響を与える降雨分布や先行晴天期間の考慮の有無も含め、その目的に応じた解析手法を選択し、評価することが肝要である。

謝辞：各種の資料を提供して下さった大阪府の関係各位に感謝いたします。なお、本研究の解析・評価は得られたデータを基に独自に行ったものである。

参考文献

- 1) 植松龍二：都市のノンポイント汚濁負荷削減対策，第5回日

本水環境学会シンポジウム講演集，pp.157-160，2002。

- 2) たとえば、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、国土技術政策総合研究所資料、No.323，pp.15-18，2006。
- 3) 山田淳：面源負荷-その現状と課題-，環境技術，Vo.29，No.7，pp.496-501，2000。
- 4) 日本下水道協会：日本の下水道（平成19年），2007。
- 5) 土木研究所：都市域からの雨天時汚濁流出調査報告書，土木研究所資料第1019号，1975。
- 6) 建設省都市局下水道部監修：合流式下水道越流水対策と暫定指針-1982年版-，日本下水道協会，1982。
- 7) 和田安彦，三浦浩之：都市域ノンポイント汚濁負荷の堆積・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，pp.61-71，1997。
- 8) 古米弘明，市川新，脇岡靖明：分布型モデルを用いた浸水対策用雨水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。
- 9) 金泰成，山田淳，文亨夫：雨水貯留施設による雨天時ノンポイント流出汚濁物のリアルタイム制御，環境システム研究論文集，No.28，pp.105-113，2000。
- 10) 二瓶泰雄，市原翔平，吉田拓司，宮子雄太，林薫，上原浩，東海林太郎，湯浅岳史：印旛沼の水環境再生を目的とした市街地流域対策に関する総合的検討，水工学論文集，Vol.53，pp.1093-1098，2009。
- 11) Wallingford Software Ltd.: IWCS v8.5 Documentation, 2008.
- 12) 和田安彦，尾崎平，村岡基：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，Vol. 62，No. 1，pp.201-210，2006。
- 13) 和田安彦，尾崎平，笹井満，村岡基：浸水対策用貯留施設のリアルタイム制御による雨天時汚濁負荷低減に関する研究，下水道協会誌論文集，Vol.45，No.551，pp.87-101，2008。
- 14) 長岩明弘，攝津克信，中島典之，古米弘明：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，第33回環境システム研究論文発表会講演集，pp.435-440，2005。

(2009. 9. 30受付)