

合流式下水道排水区の流出モデルシミュレーションによる局所的 SS 堆積管渠の特定と類型化

Categorization of combined sewer pipes based on the characteristics of deposition of SS using model simulation

糸井 優輔*

古米 弘明*

中島 典之*

Itoi Yusuke

Furumai Hiroaki

Nakajima Fumiyuki

ABSTRACT

In order to reduce CSO(combined sewer overflow) pollution, it is necessary to understand the transport mechanism of pollutants in the CSO network and to estimate the pollutant load quantitatively. In this study, we investigated the deposition of SS in the sewer network during dry weather period by a distributed model since the pipe deposit contributed significantly to the SS concentration during rainfall event. The model simulation revealed that 49.9% of the total deposit in the sewer network accumulated in 8.7% (length based) of the pipes. The pipes in which the deposit highly accumulated were categorized into three groups with structural differences : 1)pipes with lower invert level than the downstream pipes, 2)pipes with inverse slope, and 3)pipes with significantly larger diameter than the upstream pipes.

KEYWORD

Combined Sewer Overflow、distributed model、deposit accumulation、pipe structure

1.はじめに

排水規制の強化や下水道の整備が進むにつれて公共用水域の水質保全において改善がみられてきているものの、依然として合流式下水道雨天時越流水（CSO）由来の汚濁問題は存在しており、その負荷削減対策の必要性が高まっている¹⁾。適切な汚濁負荷量の削減対策を効率良く行うためには CSO 現象の解明と定量的な把握が必要である。

合流式下水道システムでは、市街地内の土地利用に応じた地表面汚濁堆積物^{2)・3)}に加え、晴天時の汚水由来の合流管路内汚濁堆積物が一括して雨天時に流出するため汚濁流出現象は複雑である⁴⁾。異なる地表面分布特性や管路ネットワーク情報を活用して汚濁解析が可能となる分布型モデルでは、このような複雑な雨天時汚濁現象を定量化する強力な手段になりうると考えられる^{5)・6)}。

本研究では代表的な分布型モデルソフトウェア⁷⁾の一つを活用して、CSO 現象の定量的な評価を行うために重要であると考えられる管路内堆積物の挙動⁸⁾を把握することを目的とし、管路が有する構造に起因する水理学的特徴に関連付けて、雨天時前の管路内堆積物量の違いが存在するかどうかに着目する。具体的には次のような点に着目して研究を行った。

- ① 先行晴天日数の大きく異なる降雨条件での解析を通じて、観測データをもとに分布型モデルにおける汚濁解析モデルパラメータのキャリブレーションを行うこと。
- ② 十分に再現性が得られたポリュートグラフの解析条件において、シミュレーション上で想定される管路内の堆積物状況を把握し、どのような管路に堆積しやすいかを特定し、それらの管路の構造的特徴を類

*東京大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

型化すること。

2.対象排水区・観測データについて

図1に本研究の対象排水区図を示す。この排水区の面積は168.8haであり、計画処理人口は14,600人である。下水排除方式は合流式（一部分流式）、排水区の末端の吐き口から二級河川に放流される。この排水区は3つの地区A,B,Cからなる。

西に位置するC地区内に公園内貯留池（容量=9,100m³）と池（容量=6,500m³）が存在している。特殊構造物としては、その貯留池の周辺にポンプ場や堰が複数見られる。この排水区を対象に、2000年から2001年にかけて国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究室により雨天時流出汚濁調査が実施された。No.1地点（排水面積33.5ha）と吐き口の手前のNo.3地点（排水面積168.8ha）において流量観測とSSをはじめとした水質分析が行われたが、ここではNo.3地点における観測データを用いて解析を行った。また、その際に観測された降雨データの内解析対象とした2降雨の先行晴天時間、降雨継続時間、総降雨量、最大降雨強度を表1に示す。この2降雨を比較すると、降雨継続時間、総降雨量、最大降雨強度は類似しているが、先行晴天時間が大きく異なる点が挙げられる。



表1：観測降雨データ

図1：対象排水区図

降雨開始日時	先行晴天時間 (hr)	降雨継続時間 (min)	総降雨量 (mm)	最大降雨強度 (mm/hr)
2000/3/4 14:35	309	690	9.1	6.0
2001/5/30 20:45	8	575	13.0	6.0

3.モデル設定条件と解析結果

3.1 雨水流出解析における設定条件

本研究では流出解析モデル利活用マニュアル⁷⁾の対象となった分布型モデルソフトウェアのうちHydroWorksの改良版であるInfoWorksを用いた。汚濁負荷流出解析においては、まず水理学的な状況を把握する必要があり、人孔、管渠、ポンプ位置等の記録を含む下水道台帳データを利用して管路ネットワーク情報を入力した排水区システムデータを構築する。本排水区には、計934本の下水管が敷設されている。次に、工種や地表面汚濁堆積量設定のために土地利用データが必要となる。本研究では、脇岡ら⁸⁾の検討を参照して、細密数値情報（10mメッシュ土地利用データ）に基づき土地利用分類ごとに3つの工種（屋根、道路、浸透域）の割合を与えることでそれぞれの面積配分の算定（表2）を行った。また、雨水流出解析において降雨損失モデルとして初期損失とホートン浸透式を、流出追跡モデルとして二重線形貯留池モデルを、管路内水理モデルとしてSaint-Venant式を用いた。降雨損失モデルの流出特性パラメータ値に関しては、過去の解析に一般的に使用されている数値⁹⁾では雨水流出総量を低目に算定することから、それを一致させるように浸透域の初期損失を6mmから2mmに減じる調整を行った。最終的な3種類の工種に対して降雨損失モデルにおけるパラメータは表3のように与え、流出追跡モデルと管路内水理モデルにおけるパラメータはデフォルト値を用いた。また、合流式下水道排水区を対象とする場合、入力データとして晴天時汚水量

データが必要であり、晴天時流量時間変動パターン（例えば A 地区では平均汚水量 611.8L/人・日、変動比の範囲 0.24～1.42）を晴天時の観測流量データから作成した。また、降雨データ（表 1 参照）は 5 分間隔に観測されているため、計算の時間刻みも同様にした。

表 2：細密数値情報により求めた工種別割合

区域	面積 (ha)	屋根(%)	道路(%)	浸透域(%)
A	60.8	36	13	51
B	30.5	40	11	49
C	77.5	26	10	64
合計	168.8	32	11	57

表 3：雨水流出解析パラメータ

工種	初期損失 (mm)	浸透能 (mm/hr)
屋根	0	-
道路	2	-
浸透域	2	10

3. 2 雨水流出解析結果

雨水流出解析結果を図 2 に示す。前節で述べたように浸透域の初期損失を調整することにより、2 降雨ともピーク高さ、波形ともに再現できているように考えられる。この解析結果は、本研究対象地域のような市街地密集地域における浸透域と一般的に定義されている浸透域とでは初期損失が異なるという可能性を示唆している。

3. 3 汚濁負荷流出解析モデルパラメータと堆積量の初期条件

合流式下水道における雨天時下水中の SS の起源として、降雨前の地表面と管路内の汚濁堆積物および降雨中の汚水が考えられる。InfoWorks には地表面堆積、地表面掃流、管路内輸送過程に関するモジュールが組み込まれており、地表面堆積物由来と汚水由来（晴天時における管路内堆積物も含む）を区別して汚濁負荷量を計算することが可能となっている。地表面堆積量は先行晴天時間の指数関数で表現され、地表面掃流はデボルデ流出モデルで表現されている。また、管路内の巻き上げ・沈殿過程は、Ackers and White 式により計算される堆積物の巻き上げや SS の沈殿が起こる限界 SS 濃度と現状の SS 濃度とを比較することで表現されている。管路内輸送モデルにおいては懸濁粒子の比重と粒径、地表面堆積モデルにおいては地表面堆積速度と減衰係数、地表面掃流モデルにおいては浸食係数が任意に設定可能である。本解析では表 4 のように設定した。地表面堆積モデルの地表面堆積速度は中村が報告している 13kg/ha/day を不浸透面に対して排水面積単位で与え、他のパラメータについてはソフトウェアのデフォルト値である。また、晴天時汚水水質および汚濁負荷量は、汚水量の時間変動と同様に晴天時観測水質データから時間変動パターン（例えば A 地区では SS 濃度平均値 158.9 mg/L、変動比の範囲 0.38～2.12）の作成を行った。

次にこれらのパラメータ値を用いて地表面堆積量と管路内堆積量の初期条件を設定した。先行降雨後に残存している堆積量が無視できると仮定し、地表面堆積量を先行晴天時間の指数関数で求めた。管路内堆積量は、晴天時汚水データを与えた無降雨条件下でのモデル計算を先行晴天時間だけ行い、初期条件として与えた。

表 4：汚濁負荷流出解析パラメータ

管路内輸送モデル		地表面堆積モデル	
比重	粒径(mm)	地表面堆積速度 (kg/ha/day)	減衰係数 (day ⁻¹)
1.7	0.05	13	0.08

3. 4 汚濁負荷流出解析結果

汚濁負荷流出解析を行った結果を図 3 に示す。先行晴天時間が大きく異なるため流出 SS 負荷量レベルは異なるものの、降雨初期のファーストフラッシュ現象を再現できている。また、その最初の汚濁流出の起源の多くは、管路内堆積物由来であると計算されている。観測データは連続的には取得されておらず、またその SS の起源の内訳は分からない。したがって、後半の細かなピークの再現性や汚濁負荷量の由来の妥当性などを議論できないが、汚濁負荷量やその流出波形としては満足のいくレベルで再現できていると考えられる。ここで得られた解析精度から判断して、地表面や管路内の堆積物の状況の初期条件が適切になされている。

たものと想定される。そこで、本シミュレーション上ではどのように管路に多く堆積物が蓄積していたかを調べた。

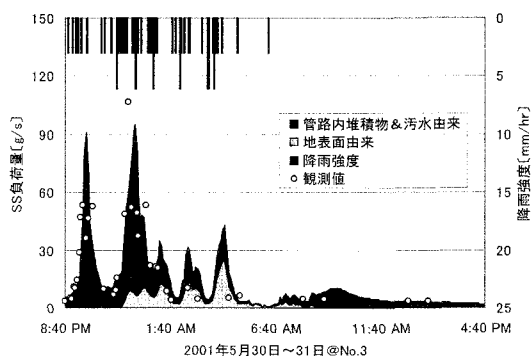
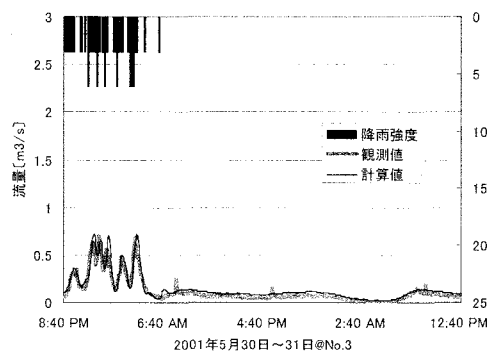
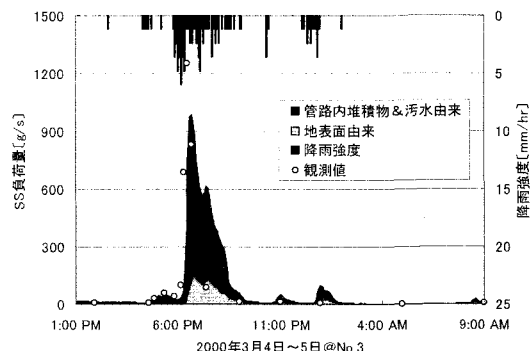
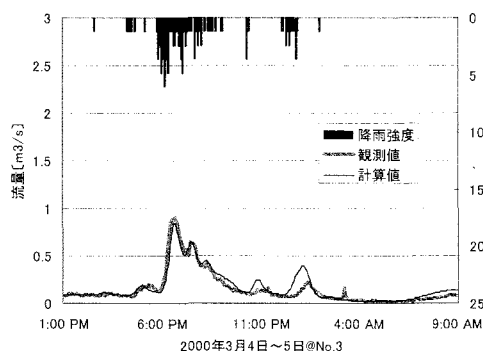


図 2：雨水流出解析結果

図 3：汚濁負荷流出解析結果

4.局所的な汚濁堆積が生じる管路の特定と類型化

CSO 汚濁負荷量への影響が大きいと考えられた先行晴天期間中の管路内堆積物がどの管路に存在しているかを調べるために、水理学的に影響を与える管路の構造上の特徴とそれらの管路内の堆積量とを関連付けて整理することは有意義である。そこで管路についてその管径と勾配別の管路延長分布を図 4 のように整理し、同じように図 5 にはそれらの管路への堆積物量分布（2000 年 3 月 4 日～5 日の降雨前の堆積量計算値）を表示した。Z 軸はそれぞれ管路の総延長中に占める割合（図 4）、全堆積量中に占める割合（図 5）を表している。この排水区内の管路延長としては面的整備を担う管径が 250mm から 300mm のものが多く存在しているが、図 5 に示されるように堆積物に関しては管径と勾配の別の管路の存在分布とは異なり、様々な箇所に大きなピークが存在する。このことより、排水区中に堆積しやすい管路が存在すると思われる。そこで、個別の管路について、堆積しやすいと計算された管路の特定を行い、その構造上の特徴について詳細に調べた。

管路内堆積物量 [kg] の計算結果の大きい管路の構造上の特徴を比較することで、構造に起因する水理学的な特徴により類型化された 3 つのグループに集中して堆積物が存在していると計算されていることが判明した。以下にその 3 つのグループを示す。

- ① 下流で接続する管底高の方が高くなっている管路、またはその影響で流れが滞っている管路
- ② 逆勾配の管路、またはその影響で流れが滞っている管路
- ③ 上流の管路と比較して管径が急激に広がっている管路

これらの類型化された管路の断面図の例を図6に示す。また、3つに分類されたグループ毎の管路数と管路延長、およびその管路への堆積量を2000年3月4日～5日の降雨前のシミュレーション上の初期堆積条件に基づいてまとめ、表5に示す。

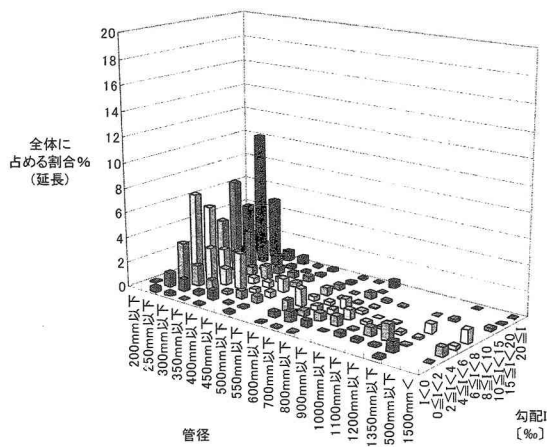


図4：管径と勾配別の管路延長分布

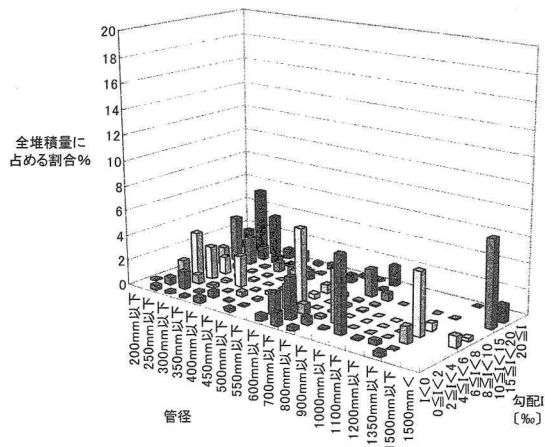


図5：管径と勾配別の堆積物量分布

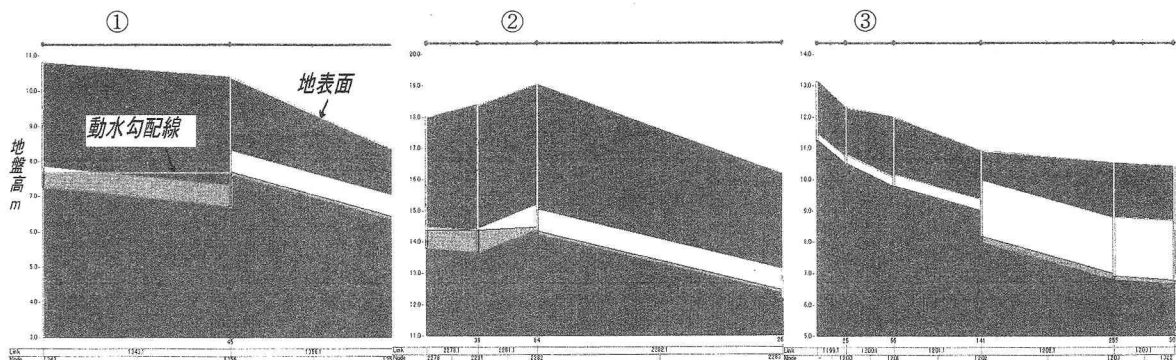


図6：局所的な堆積が生じる管路の断面図

表5：3つの特徴毎の管路本数、管路延長、それらの管路への堆積量(%)

	①	②	③	合計
本数 [本]	29	20	8	57
延長 [m]	2592.4	899.2	930.4	4421.9
総延長中の割合 [%]	5.1	1.8	1.8	8.7
堆積量 [kg]	1514	1212	983	3709
総堆積量中の割合 [%]	20.4	16.3	13.2	49.9

※2000年3月4日～5日の降雨前の堆積状況による計算結果

表5に見られるようにシミュレーション上ではこれらの3つの構造上の特徴を有すると分類された管路(全体の約9%の延長の管路)に、全体の約50%の堆積物がたまっている。今回の解析では、この計算結果の妥当性を検証したり証明するにいたっていないものの、晴天時における管路内の構造に起因する水理学的な特徴によって堆積物が局所的に蓄積して、それが降雨初期のファーストフラッシュに大きく影響している可能性を示唆するものである。今後、この結果の妥当性を実証するために現地での管路内の堆積物の観察が必要であると考えられる。また、この結果が検証されたり、予測精度の限界を理解することで、汚濁解析モデルの改良や取り扱いに関する留意点を整理することが可能になると考えられる。ひいては、汚濁モデル解

析を利用した CSO 汚濁負荷量削減のための適切な対策を効率良く検討することが可能になると期待される。

5 まとめ

合流式下水道排水区を対象として、分布型モデルを用いた雨水流出汚濁解析結果に基づいて管路内の堆積物の挙動を検討した結果、次のようなことが明らかになった。

- ① 先行晴天時間の大きく異なる 2 降雨について雨水流出解析を行い、その結果を用いて汚濁流出解析を行ったところファーストフラッシュ現象、汚濁負荷量、および流出波形を満足できるレベルで再現することができた。ここで得られた解析精度より、地表面や管路内の堆積物の状況の初期設定が適切になされたものと想定される。
- ② シミュレーション上では、構造に起因する水理学的な特徴により 3 つに類型化された管路群に集中して堆積していると計算されていた（管路延長約 9%の管路に全堆積量の約半分が堆積）。このような構造に起因する水理学的な特徴により、晴天時には局所的な堆積が起り、その結果降雨初期のファーストフラッシュ現象に大きく影響を与える可能性が示唆される。
- ③ 今回は前述の結果の妥当性を検証するにはいたっていないが、今後この結果の妥当性を実証するために実際に管路内の堆積物の観察を行う必要がある。この結果が実証されれば、汚濁負荷流出モデル解析を用いた CSO 汚濁負荷量削減のための適切な対策を効率良く検討することが可能になると期待される。
- ④ また、今回は管路の構造に起因する水理学的な特徴による類型化の段階にとどまったが、今後これらの類型化された管路内における堆積しやすさの数値的評価方法の提案が求められる。適切な評価方法が提案されることで他排水区における CSO 汚濁負荷量削減対策の検討も容易に可能になることが期待される。

謝辞

本研究を行うにあたり観測データを提供いただいた国土技術政策総合研究所下水道研究室の森田弘昭氏、那須基氏、また対象排水区の下水道ネットワークファイルデータの提供等ご協力を頂いた日本上下水道設計㈱の中山義一氏、中井博貴氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、財）下水道新技術推進機構：合流式下水道の改善対策に関する調査報告書、2003
- (2) 肱岡靖明、古米弘明、中島典之：分流式下水道における粒径別 SS 汚濁負荷の雨天時流出特性、第 3 回水環境学会シンポジウム講演集、p91-92、2000
- (3) 肱岡靖明、古米弘明：都市ノンポイント汚染源負荷流出調査に基づく不浸透面堆積負荷流出モデルの検討、土木学会論文集、No.685、VII-20、pp.123-134、2001
- (4) 渡辺和紀、川本和昭：合流式下水道の改善対策に関する調査研究－雨天時流量・汚濁負荷流出モデルと簡略化の検討－、下水道協会誌、Vol.24、No.280、1987
- (5) 肱岡靖明、古米弘明、市川新：下水道台帳データと細密数値情報を利用した分布型モデルによる大都市下水道排水区の流出解析、下水道協会誌、Vol.38、No.469、2001
- (6) 古米弘明、肱岡靖明、市川新：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、2001/9
- (7) 財）下水道新技術推進機構：流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き）、1999
- (8) J.C.Ackers, D.Butler, R.W.P.May : Design of sewers to control sediment problems, CIRIA, 1996
- (9) 建設省土木研究所：都市域からの降雨流出調査報告（河川事業調査費報告）、土木研究所資料第 1018 号、1975