

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14329

研究課題名（和文）雨水吐き口における水位と電気伝導度の変化に基づく雨天時越流水汚濁負荷量の評価

研究課題名（英文）Assessing pollutant load emission from combined sewer overflows based on monitored changes of water levels and electric conductivity at overflow chambers

研究代表者

古米 弘明（Furumai, Hiroaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：40173546

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、合流式下水道雨天時越流水由来の汚濁負荷の発生やその挙動を把握することを目的として、分布型下水道モデルによって管路内堆積物の蓄積・掃流・輸送を解析した。その結果、晴天時の蓄積，雨天時の掃流ともに空間的差異が大きく，越流負荷の起源の特定には空間的な蓄積・掃流特性の両面を考慮する必要があることが推察された。

また、管路内の水位と水温と電気伝導度を計測して、汚濁負荷の発生などを実測した。その結果、最大水位と降雨強度の相関関係から浸水対策施設への越流有無の判定が可能となること、電気伝導度計測データから、雨天時の下水の希釈状況やファーストフラッシュの影響を検討できることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Accumulation and transport of in sewer sediments was studied using a distributed sewerage model to evaluate the occurrence and the behavior of combined sewer overflow (CSO) loads. It was found that there is a large spatial variation in the amount of sediment deposited during dry weather and transported during wet weather. It indicated that spatial distribution characteristics of sediment accumulation and transport should be considered in a sewer network in order to identify the significant sources of the CSO loads.

Occurrence of CSO loads was evaluated by monitoring water level, water temperature and electric conductivity in combined sewers. It was possible to judge the occurrence of overflow to storm water storage facility for flood control based on the relationship between water level and rainfall intensity. EC monitoring data can be used to evaluate dilution level of wet weather wastewater and estimate the contribution of first flush on the pollutant load in combined sewer pipes.

研究分野：水環境保全・制御

キーワード：環境質定量化・予測 連続モニタリン 雨天時汚濁 合流式下水道 電気伝導度

1. 研究開始当初の背景

合流式下水道は、雨天時にし尿を含む未処理下水の一部が雨水吐口から越流することから、公共用水域の汚染が社会問題化し、水質保全上及び公衆衛生上の観点から改善対策が進められている。しかしながら、全ての雨水吐口について合流式下水道越流水 (Combined Sewer Overflow: CSO) の有無を把握することは困難なことから、雨水吐口由来の CSO の寄与を定量化するモデルの検証にも限界がある。

最近の研究結果から、東京都区部における雨水吐口からの CSO 流出量のモデル推計では、降雨条件に依存するものの雨水ポンプ場からの放流量より多い場合があり、吐口を含めた CSO による汚濁負荷を定量化することが必要であると考えられる。それに加えて、CSO 流出量や汚濁量を定量化に向けたモデル推計するにあたって、流量・水質の現場計測データによるバックアップも必要となる。

電気伝導度 (Electronic Conductivity: EC) の測定は光学式の濁度測定などに比べて維持管理に優れ、長期間にわたって安定的なデータ取得が可能である。そこで、EC 測定により雨天時下水道の流量推定や希釈効果を検討した研究もあり、EC 計を活用した合流式下水道の雨天時汚濁現象の把握を試みることは意義深いと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、合流式下水道における雨天時越流水由来の汚濁負荷の発生やその挙動に着目して、以下のような目的で研究を行う。

(1) 分布型下水道モデル解析による管渠内堆積物の動態解析

- ① 分布型下水道モデル (InfoWorks CS) を用いて管渠内堆積物の動態解析を行い、管内堆積物の蓄積量の多い場所と越流量の大きなウェイトを占めている雨水吐口を選定する。
- ② 様々な降雨イベントにおける管内掃流現象をモデル解析し、降雨による越流負荷のうち堆積物由来の割合を推定する。

(2) 合流式下水道管路内における水位と水質の計測

- ① 雨天時管内水位とともに、水温と EC の連続的な計測を行い、モニタリングデータを収集し、その変動特徴を把握する。
- ② 計測された最大水位と時間降雨強度の関係を調べることによって、浸水対策施設が設計とおり機能していたか調査する。
- ③ 各ポンプ排水区における計測水位の上昇に連動した EC の変動特徴を把握するとともに、先行晴天日数の異なる降雨時の下水の希釈状況やファーストフラッシュの影響を検討する。

3. 研究の方法

当初の研究計画では、東京都目黒排水区を

対象として、モデル解析を行うとともに、下水管路内に水位および EC センサを設置する予定であったが、東京都下水道局との協議により、管路内や越流箇所へのセンサ設置は危険性が高いことから、当該排水区へのセンサ設置は困難であることが判明した。

結果として、分布型下水道モデル解析についてはすでにモデル化が完了していた目黒排水区を、管路内水位と EC 測定に関しては、横浜市鶴見川流域のポンプ排水区を対象に実施することとなった。

(1) 目黒川排水区と解析対象降雨

図 1 に示すように、当該排水区は流域面積 45.8 km² を有しており、6 つの排水区で構成されている。この排水区にける流出解析にあたっては、分布型下水道モデルシミュレーションソフトウェア InfoWorks CS [ver. 15.5] を用いた。モデルデータは、浸水解析にも利用例のある東京都下水道台帳のデータを入力した。各種パラメータについては、主にソフトウェアのデフォルト値を採用したが、本研究において重要度の高い Ackers & White による懸濁物質輸送堆積理論と関連するパラメータの設定については、既往研究を参照した。

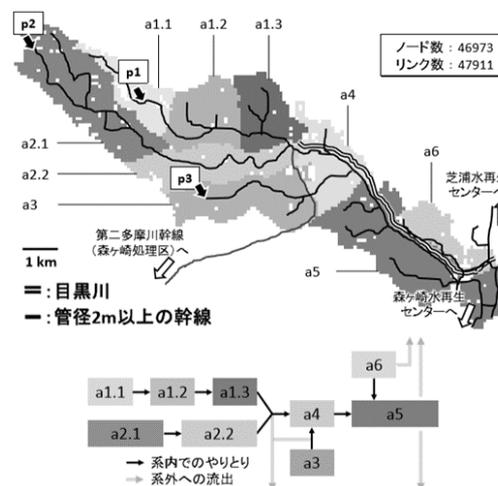


図 1 目黒川排水区の概要および小排水区間の接続状況

目黒川排水区における対象降雨については、東京都建設局河川部防災課より 2007 年のデータを入力した。そして、排水区内の雨量計測所のうち、欠測や異常値が散見されたものを除いた 18 計測所におけるデータを用いた。

(2) 鶴見川排水区と対象降雨

雨水幹線に水位計と温度計付 EC 計の設置が他のプロジェクトとの連携により実施することができたため、本研究では、鶴見川流域のポンプ排水区 (流域面積 49 km²) の計測データを用いて、雨天時越流水による汚濁負荷量評価の可能性を検討することにした。

図 2 中★印で示した鶴見川排水区のポンプ場 (江ヶ崎、北綱島、港北水再生センター第

3 (港北 3)) へ流入する雨水幹線から新羽末広幹線 (以下、貯留管と称する) への分水箇所付近に圧力式水位計と温度計付き EC 計を設置した。

そして、2016 年 2 月 26 日～12 月 12 日の期間中、水位と EC と温度を 10 分間隔で計測した。センサは 3 か月ごとに点検・交換した。なお、水位はセンサ設置位置高さからの値であり、温度は EC 計の記録値を用いた。

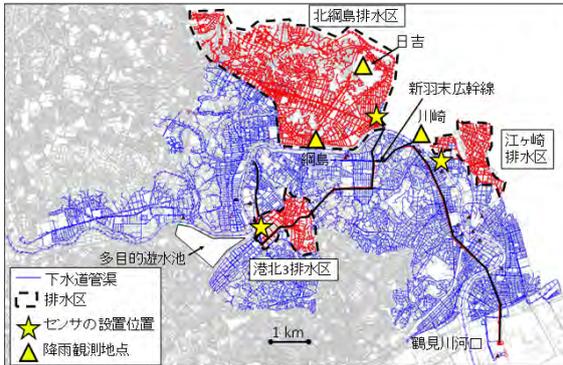


図 2 鶴見川排水区におけるセンサ設置位置

鶴見川排水区における解析対象降雨は、センサ設置時期 (2016 年 2 月～12 月) に合わせて、3 ポンプ排水区における直近の雨量計の 10 分間隔雨量情報を用いることとし、江ヶ崎地点は川崎雨量計測所の国土交通省テレメータデータを、北綱島地点は綱島雨量計測所のテレメータデータと日吉のアメダスデータの平均値を、港北 3 地点は綱島雨量計測所の国土交通省テレメータデータを用いた。それぞれの降雨計測地点の位置は、図 2 中▲で示した。

4. 研究成果

(1) 管内堆積物の動態モデル解析による雨天時越流現象について

① 解析対象降雨イベントの抽出

降雨が計測された時点の前後に 5 時間以上の無降雨状態があるものを独立な降雨イベントとして定義し、2007 年の降雨データを整理したところ、128 のイベントが抽出された。さらに越流の発生が推定されたのは 74 イベントであった。

降雨イベントの特性値として、「総降雨量」、「30 分間最大降雨強度」、「平均降雨強度」、「降雨重心から河口までの距離」を取り出し、4 つの特性値に基づくクラスター分析を行って、74 降雨イベントを 6 つに分類した。そして、各クラスター内の最も平均的なイベントを選定した。また、時空間的に一様な仮想降雨 (e0) も追加して、表 1 に示す計 6 つの降雨を解析対象とした。

当該排水区における先行晴天時間の平均値は 4 日程度であったため、晴天時流出解析の計算期間を 4 日に設定し、その後連続的に雨天時モデル解析を実施することにした。

表 1 解析対象降雨

分類	代表イベント	総降雨量 [mm]	30分間最大降雨強度 [mm/hr]	平均降雨強度 [mm/hr]	降雨重心から河口までの距離 [km]
-	e0	10.0	4.0	4.0	7.2
1	e1	23.4	35.1	12.8	8.5
2	e2	34.2	11.8	4.6	7.4
3	e3	12.7	7.8	3.0	7.1
4	e4	3.4	3.5	1.6	8.1
5	e5	1.9	2.4	1.1	5.4
6	e6	107.5	18.2	1.8	8.0

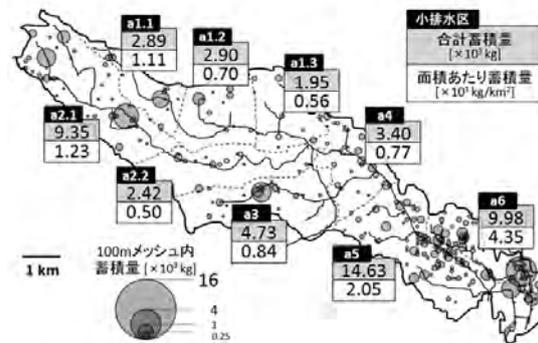


図 3 晴天時間 4 日後の管内堆積物の蓄積量

② 雨天時における管内堆積物の掃流現象の解析

雨天時越流負荷の起源として晴天時の管路堆積物が重要である。堆積物の量の大小だけでなく、雨天時に容易に掃流されるかどうかを推定することは意義深い。そこで、降雨に対する平均的な先行晴天時間として 4 日間の晴天シミュレーションを行った後 (図 3)、排水区内に空間的に一様な仮想降雨 e0 を与え、堆積物掃流量の大きい箇所、すなわち越流負荷に大きく寄与する箇所の特定を行った。

図 4 に、e0 による各小排水区の堆積物掃流率を示す。降雨が空間的に一様である場合でも、掃流率が小排水区ごとに異なることが読みとれる。また、e1、e2、e3 においても同様の傾向が見られた。このことから、堆積物が晴天時に蓄積しやすい一方、雨天時に掃流されにくいような箇所があることが判明した。すなわち、越流負荷の起源を特定し、効果的な清掃を行うためには、堆積物の晴天時における蓄積しやすさと雨天時における掃流されやすさの両面を考慮する必要がある。

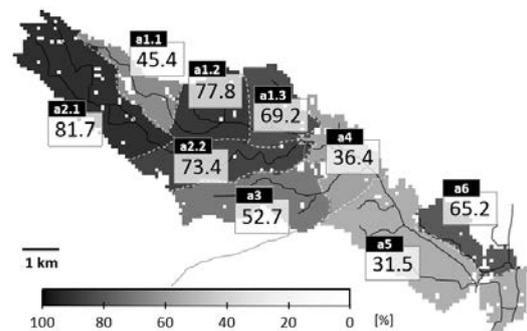


図 4 晴天時間 4 日後の降雨 e0 による各小排水区の堆積物掃流率

図5に先行晴天時間と堆積物由来越流負荷量の割合の関係を示す。降雨継続時間が約2.5日と極端に長いe6を除き、先行晴天時間2日以上の場合、降雨による越流負荷のうち堆積物由来のものが大きな割合を占める場合が多くなる傾向がうかがえた。なお、e4、e5は総越流負荷量が他の降雨イベントに比べ極端に小さく(1/100~1/50程度)推定されたため、堆積物由来越流負荷の量や割合の算出を省略した。

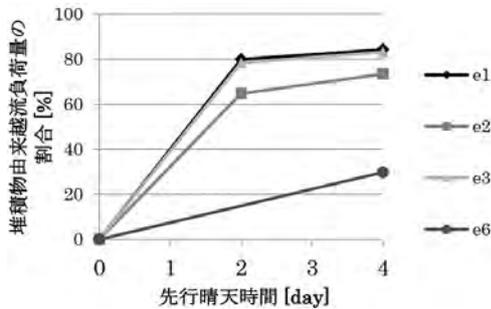


図5 各先行晴天時間・降雨イベントにおける堆積物由来越流負荷量の割合

(2) 管内観測水位とECと温度の変動特性について

① 強雨時における管内水位とECと温度の変化

センサを常時設置した2016年2月~12月の期間中、7月から9月にかけて3地点とも5回の顕著な水位上昇を観測でき、水位上昇に呼応してECと温度が観測された(図6、図7、図8)。

a)江ヶ崎、b)北綱島地点のEC値は、平均的な都市下水のEC値(500~800 μ S/cm程度)を超えることがないのに対して、c)地点では降雨時以外でも2000 μ S/cm以上の高い

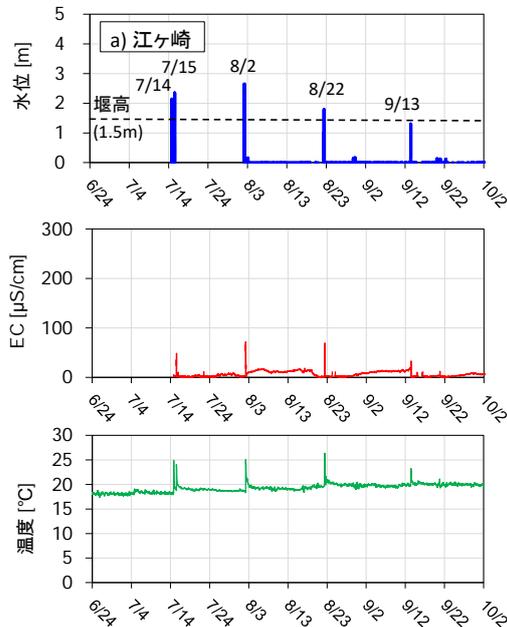


図6 江ヶ崎地点における水位、電気伝導度、温度の計測データ(2016年6月24日~10月2日)

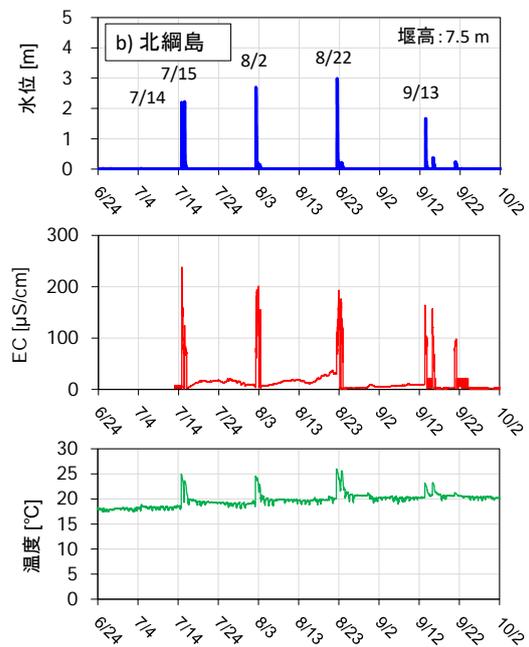


図7 北綱島地点における水位、電気伝導度、温度の計測データ(2016年6月24日~10月2日)

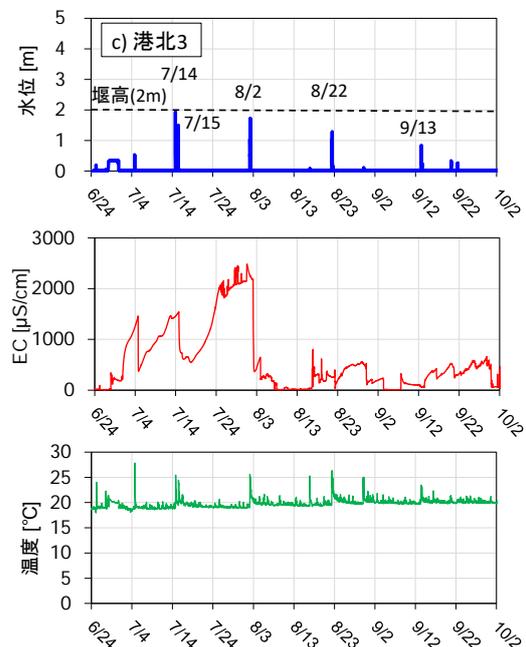


図8 港北3地点における水位、電気伝導度、温度の計測データ(2016年6月24日~10月2日)

EC値が観測された。これは、ポンプ場の試運転前にポンプ井に溜めておいた汚水が逆流して、晴天時にもかかわらず水位が上昇し、EC値に影響した可能性があるため、ECについては解析対象外とした。

温度計測値は、7月から9月にかけて18 $^{\circ}$ Cから20 $^{\circ}$ C前後で推移しながら上昇傾向を示し、雨天時水位上昇に呼応して水温が23~26 $^{\circ}$ Cまで上がった。これは、当該排水区は市街化が進行しており、不浸透面積率も75%以上と高い。そして、夏季晴天時には不浸透面

としてのアスファルト舗装道路面は熱くなっており、温められた道路流出雨水の影響が水温に反映されていると考えられた。

② 各ポンプ排水区における浸水対策施設の機能

水位観測期間中、10cm 以上の水位観測の回数は図9に示すように a)江ヶ崎と c)港北3でそれぞれ10回、b)北綱島で7回あった。

a)地点では、観測水位から判断して4回の貯留管への越流が想定されるが、c)地点では7月14日では越流判断が難しいが、その他のイベントでは越流が発生していなかった。特に、b)地点では管径6mもある雨水幹線であり、堰高からかなり低い状況にしか雨天時下水が到達していない実態であった。

横浜市では、時間50～60mmの降雨強度に対する浸水防止対策として、雨水貯留施設などが設計・整備されているが、観測結果から a)と c)地点については、時間雨量40mm未満でも貯留管への越流可能性が確認されて、設計より弱い時間降雨強度に対して浸水対策施設が機能していることが明らかになった。

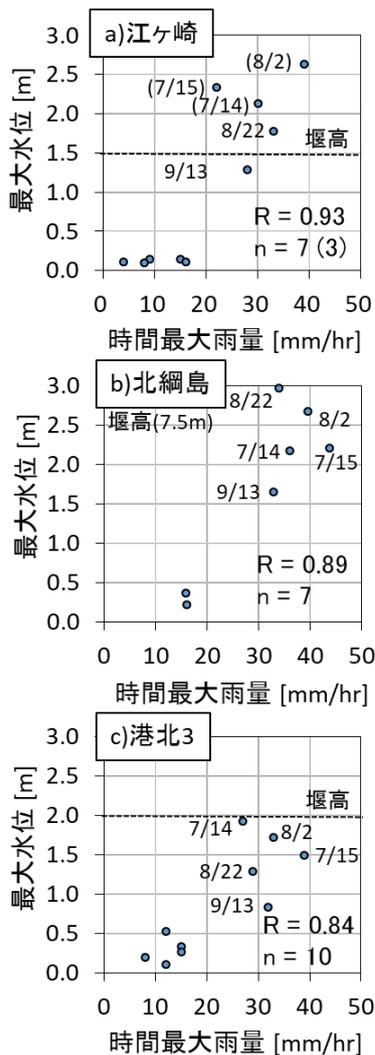


図9 最大水位と時間最大雨量の相関関係

③ 北綱島地点における EC 変動

7月から9月の間に、管内水位が20cm以上で、30分以上の連続したEC計測ができた5つの降雨に対してデータを抽出した。その中、大気的不安定による豪雨時(8月2日)と台風の時(8月22日)と秋雨前線による9月13日降雨について、北綱島地点における水位上昇時のEC変動を図10に示した。ECの最大値が130～190 μS/cm 範囲であり、晴天時汚水のEC値と比較して低く、雨水により希釈されて雨水幹線に流入していたものと推察された。

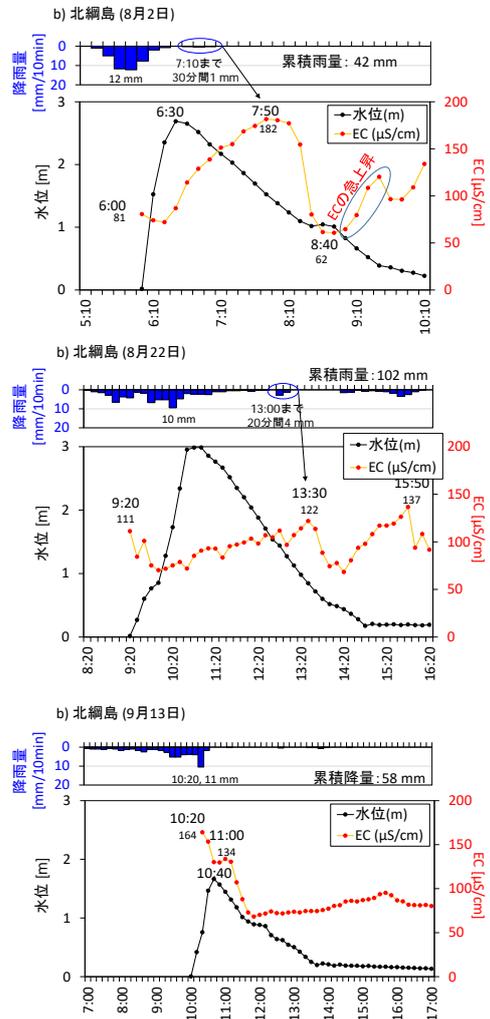


図10 北綱島地点における水位に呼応したECの時系列変化(2016年8月2日・22日、9月13日)

④ 先行晴天日数の異なる降雨における EC の変動特性

北綱島地点において、先行晴天日数が最も長い7月14日と最も短い7月15日における水位とECの経時変化を図11に示す。

5日強の先行晴天日数を有する7月14日では、水位が計測され始めた時点で最も高いEC値(238 μS/cm)が計測され、その後の水位低下とともにEC値も140-150 μS/cm程度まで下がり5-6時間ほど継続した。そして、その後2-3時間をかけて70-80 μS/cmまで低

下していた。続いて、約 16 時間の短い先行晴天期間を有する 7 月 15 日でも、最も高い EC 値 (124 $\mu\text{S}/\text{cm}$) が最初に計測されたものの、1 時間程度で 70-80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ まで低下した。この値は、前日の 7 月 14 日における最終的な値と同程度であり、長い間継続したままそれ以上の低下は計測されなかった。

次に、これらの 2 降雨において水位に対する EC の時系列変化を図 12 に示す。両者の時計回りの時系列変化パターンは類似しているものの、EC レベルは大きく異なる。これは、晴天時における下水が流出雨水により希釈される現象のほかに、ファーストフラッシュに伴う管路内堆積物に起因する EC 値の上昇の影響があるものと推察される。そのため、7 月 15 日では、前日降雨による掃流効果からファーストフラッシュの影響がほとんどなかったものと推察される。そのため、14 日より低い EC 値が計測され、そして、すぐに前日降雨で計測された最終的な EC 値レベル (70-80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度) で安定したものと考えられた。

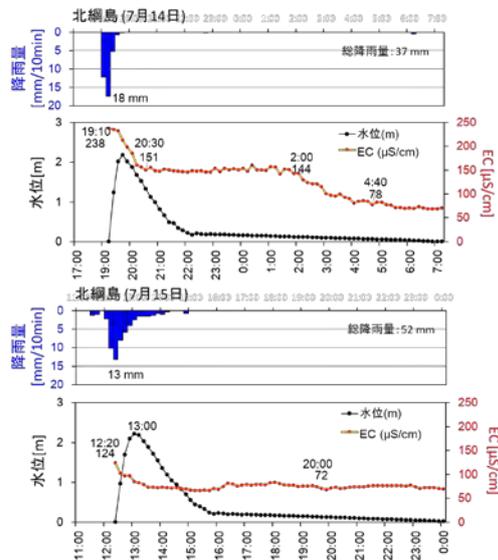


図 11 綱島地点における水位と EC の経時変化 (2016 年 7 月 14 日と 15 日)

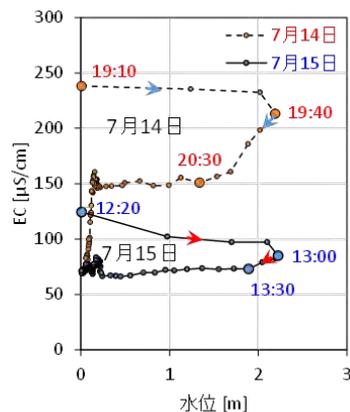


図 12 北綱島地点における水位に対する EC 時系列変化 (2016 年 7 月 14 日と 15 日)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) 佐貫 宏、洪尾 欣弘、李 星愛、吉村 耕平、田島 芳満、古米 弘明、佐藤 慎司 (2017 年): 都市沿岸部を対象とした浸水ナウキャストシミュレーション、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、73、p.I_499 ~I_504
- 2) 賀須井 直規、春日 郁朗、栗栖 太、片山 浩之、古米 弘明 (2016 年): 下水管内堆積物の動態モデル解析を用いた清掃水投入による雨天時越流負荷削減量の評価、土木学会論文集 G (環境)、72(7)、p.III_153~III_160

[学会発表] (計 4 件)

- 1) 佐貫 宏、洪尾 欣弘、李 星愛、吉村 耕平、田島 芳満、古米 弘明、佐藤 慎司 (2017 年): 都市沿岸部を対象とした浸水ナウキャストシミュレーション、第 64 回海岸工学講演会、2017 年 10 月 25 日 ~10 月 27 日、札幌市
- 2) SungAe LEE, Yoshihiro SHIBUO, Hiroshi SANUKI, Yoshimitsu TAJIMA, Shinji SATO, Hiroaki FURUMAI: Long term monitoring of water level in sewer networks for validation of urban flood model, 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, 2017 年 9 月 10 日 ~9 月 15 日、Prague, (Czech)
- 3) 李 星愛、古米 弘明 (2017 年): 下水道施設内計測水位データと XRAIN を用いた鶴見川流域における内水氾濫解析、第 54 回下水道研究発表会、2017 年 8 月 1 日 ~8 月 3 日、東京
- 4) 賀須井 直規、春日 郁朗、栗栖 太、片山 浩之、古米 弘明: 下水管内堆積物の動態モデル解析を用いた清掃水投入による雨天時越流負荷削減量の評価、土木学会第 53 回環境工学研究フォーラム、2016 年 12 月 6 日 ~12 月 8 日、北九州市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古米 弘明 (FURUMAI、Hiroaki)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号: 40173546

(2) 研究分担者

春日 郁朗 (KASUGA、Ikuro)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号: 20431794