

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246090

研究課題名(和文)雨天時下水道由来の健康リスク因子の起源解析に基づく汚染制御の高度化

研究課題名(英文) Advancement of pollution control utilizing source apportionment of health risk factors from combined sewer overflows

研究代表者

古米 弘明 (Furumai, Hiroaki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40173546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000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(CSO)由来の汚濁負荷量を評価して、台場周辺海域における水質に及ぼす影響を調べ、沿岸域における糞便汚染の制御・管理に資する知見を得ることを目的としている。そのために、雨天時の流入下水や降雨後の沿岸水を採水して、ウイルスを含めた病原微生物の存在状態を調査した。そして雨天時越流水由来の汚濁流出負荷量を受水域3次元流動水質モデルに導入して水質予測を行うことで、台場周辺海域における糞便汚染状況を評価した。また、糞便汚染に伴う健康リスク因子の制御・管理のための対策検討を行った。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study are i) to quantify the pollutant loads derived from combined sewer overflow (CSO) and ii) to evaluate its impact on water quality in Odaiba surrounding waters. The research outcomes can contribute to control of fecal contamination in waterfront areas. We collected wet weather sewage and coastal water samples after rainfall event. Then we investigated presence and fate of pathogenic microorganisms, including viruses. We performed water quality predictions by 3-dimensional coastal water quality model, giving CSO pollutant load conditions. Then we assessed the fecal contamination and discussed its control in Odaiba surrounding waters.

研究分野：都市環境工学

キーワード：合流式下水道雨天時越流水 分布型下水道モデル 水質モデル 糞便汚染 大腸菌 ウイルス 管路内堆積物 電気伝導度

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の背景

首都圏の代表的な親水空間であるお台場海浜公園を含む湾奥沿岸域では、降雨後に大腸菌濃度が上昇する。この糞便汚染指標値の増加には、合流式下水道越流水(CSO)が大きく影響している。湾へのポンプ所からの直接流入に加えて、雨水吐き口を多数有する都市河川を経由して、湾奥部に流入する汚濁負荷もあり、糞便汚染の状況は複雑である。

従来型のSS、BOD、T-N、T-P、大腸菌群のような水質指標だけでなく、未規制である病原微生物としてウイルスによる健康リスクを含めて、ヒトへの曝露を詳細に評価して、対象とする親水空間へ到達する主たる発生源・起源を明確にする必要がある。

すでに、当該研究グループは、下水および管路内堆積物中のリスク因子の存在、合流式下水道からの雨天時汚濁流出ダイナミクスの成果を有している。したがって、受水域におけるリスク因子の挙動のための数値解析手法の高度化して、発生源や負荷量の寄与度、親水空間でのリスクレベルをより正確に把握する研究が重要であると考え、次の3項目について研究を推進することとした。

雨天時後での受水域におけるウイルスを含む病原微生物の詳細な存在状態や経時的な変化を調査する。

お台場周辺に特化して3次元流動・水質モデル計算により雨天時汚濁現象を定量的に予測可能にする。

健康リスク因子の起源と寄与度を明らかにして、リスクの制御や管理のための手法を高度化する。

(2) 学術的な特色・独創的な点

宿主特異的な *Bacteroidales* の 16S rRNA 遺伝子情報や腸管系ウイルスを活用した糞便汚染の起源解析を詳細に行うことで、健康リスク因子の雨天時汚濁現象時の発生源や寄与を推測する。

沿岸域に位置するポンプ場の汚濁発生源だけでなく、お台場周辺に流入する隅田川を通じて流入する汚濁負荷にも着目して、流量予測と組み合わせる雨天時汚濁負荷量調査を体系立てて実施する。

自然流下排水区における雨水吐き口と沿岸域排水区のポンプ場を主な汚濁起源として、雨天時の汚濁ダイナミクスを解明することにより、受水域への影響解析やモニタリングの課題や必要性を明確にできる。

2. 研究の目的

本研究では、合流式下水道雨天時越流水(CSO)由来の汚濁負荷が、都市沿岸域における水質に及ぼす影響を定量評価し、お台場のような親水空間における健康リスク因子(特に、病原微生物)の制御・管理に資する成果を挙げようとするものである。

沿岸域の健康リスク因子の起源を明確に

すること、そして雨天時における汚濁流出負荷量を受水域流動水質モデルに適切に導入して水質予測を行うことで、大都市の水環境保全や水辺再生だけでなく、水辺空間における安全性確保について検討を行う。

そして、健康リスク因子の制御・管理のための下水道システムの効率的運用や汚濁負荷削減対策を高度化する提言を行うことを最終的な目的としている。

上記のような、糞便汚染の起源に関する情報が加えて、水質予測モデルを活用できれば、安全で衛生的な公共用水域の保全施策が効率的に行え、水環境リスクを低減した親水空間の創出に貢献できる。また、非定常な汚濁現象も考慮した効率的な既存下水道管理手法の開発、次世代の下水道システムの高度な雨天時管理手法、その結果として、下水道を介した汚染リスク評価やリスク低減策の提案が可能になるものと考えられる。

3. 研究の方法

(1) 合流式下水道の雨天時下水の水質変動特性評価

合流式下水道の終末処理場の下水流入地点において、濁度計および電気伝導度計に加えて、アンモニアセンサを設置して流入下水の水質変動を雨天時を含めた調査をする。

特に、雨天時の汚濁負荷流出特性に影響を与える降雨直後におけるファーストラッシュ現象に着目して、異なる降雨条件において、雨天時下水の水質特性を連続観測する。

(2) 雨天時下水中の微生物群集と指標微生物の挙動

雨天時下水中の微生物群集構造およびその変動を晴天時下水と比較することで、雨天時下水に特異的に存在する微生物の探索を行う。さらに、汚水指標としてヒト糞便に特異に存在する腸内細菌 *Bacteroides*、管路内堆積物中に多く存在している硫酸還元菌に着目し、それぞれの挙動から各汚濁負荷の寄与を推定する。

(3) 雨天時越流水採取調査と雨天時後のお台場周辺域の水質調査

東京都などによる定期採水調査では、採水器を用いた定点観測が行われているが、鉛直方向の採水に時間を要し、また面的な定量評価ができない。そこで、東京湾沿岸域において鉛直3層での曳航連続採水を行い、降雨直後からの糞便汚染の実態を詳細に調査する。

(4) 雨天時下水中と環境水中の病原微生物解析と糞便汚染の起源解析

病原微生物に関して、CSOの受水域での挙動を定量的に観測した例は少なく、特に時間変動に関する情報が不足している。したがって、CSOによる影響を受けているお台場海浜公園に着目し、様々な微生物の濃度の時間変動を観測し、水質管理する上で適当な指標項

目を探索することは意義深い。また、微生物による挙動の違いを、様々な微生物濃度の時間変動を観測して調査する。

(5) 雨天時下水道汚濁流出の分布型下水道モデルによる雨天時下水道汚濁流出解析

CSO の河川内流下過程や、湾奥部へ流出する際に受ける潮位変化の影響を考慮した汚濁負荷解析により、正確に汚濁負荷流出状況を把握することが求められる。そこで、目黒川流域および神田川流域などを対象とした汚濁負荷流出解析により、CSO 由来の汚濁負荷の流出特性評価を行う。

(6) 3次元沿岸域流動水質モデルによる雨天後の水質予測シミュレーションとリスク低減対策の検討

隅田川などからの汚濁負荷を考慮した解析が可能のように水質予測モデルの拡張を行い、CSO 負荷量を考慮して、降雨後の台場周辺海域の水質変化の再現を行う。そして、CSO 対策シナリオを検討して、受水域における数値水質シミュレーションを実施して、健康リスク因子としての汚染指標微生物の動態予測を行う。そして、合流式下水道排水区を対象にした健康リスク因子制御および管理手法の提案につながる知見を得る。

4. 研究成果

(1) 合流式下水道の雨天時下水の水質変動特性評価

調査・実験方法

水再生センターにて、アンモニア濃度、電気伝導度、濁度等のセンサ類を設置して、流入下水の連続水質データの入手と雨天時下水の水質調査を行った。

実験結果および考察

アンモニアセンサによる連続測定の結果、夏期冬期ともに計測開始からの経過時間に応じて徐々に数値が低下していく傾向にあった。そこで、手分析結果との整合性を検討したところ、センサ測定値は時間変化に対して一次関数的に減少していることが分かった。そこで、図1にアンモニアセンサによる実測値と補正後の濃度変動を示している。

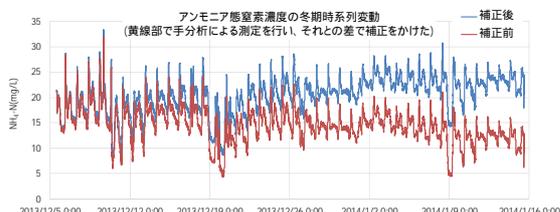


図1 アンモニア濃度の冬期時系列変動

最大降雨強度と先行晴天日数の大小により、流入流量・水質及びその負荷量にどのような変動が見られるかを評価した。その際、晴天時負荷量に対する雨天時負荷量の比を求め、対数値での変動を図2にします。

同程度の最大降雨強度であり、先行晴天日数の異なる降雨を2組比較し、先行晴天日数の違いによる負荷量変動の差異を見る。次に、この2組間での比較により、最大降雨強度の違いによる負荷量変動の差異を見る。これより、最大降雨強度の増加に伴って流量の増加が見られ、これが汚濁負荷の流出増加に大きな影響を与え、ファーストフラッシュを発生させることが明らかとなった。



図2 降雨後の負荷量変動比の例

(2) 雨天時下水中の微生物群集と指標微生物の挙動

調査・実験方法

首都圏の合流式下水道の処理場 A、B にて試料を採取した。処理場 A において 2013/6/26 の降雨時における雨天時流入下水 (n=7) を 3 時間にわたり 30 分おきに採取した。また 2012/12 月~2013/7 月にかけて、晴天時に処理場 A、B にて流入下水 (n=5) を、管路内堆積物と類似していると考えられる沈砂池汚泥 (n=1) を 2013/11/26 に処理場 A にて採取した。

微生物群集構造については 16S rRNA 遺伝子 V4 領域の配列を Miseq (Illumina) により解析した。またヒト特異 *Bacteroides* 属細菌 (Human Specific *Bacteroides*, HSB) の 16S rRNA 遺伝子、硫酸還元菌 (Sulfate Reducing Bacteria, SRB) の *dsr* 遺伝子を定量 PCR により解析した。

実験結果および考察

雨天時下水中の溶存 COD は、14:00~15:00 までは 56 ± 1 mg/L と安定した値を示したが、それ以降は減少傾向を示し、17:00 には 15 mg/L まで減少した。雨天時試料において主要な細菌種は、*Flavobacteriaceae*、*Acinetobacter*、*Acidovorax* などであり、それぞれ 11.1 ± 1.7 、 13.4 ± 3.2 、 13.3 ± 1.6 % と変動はほとんどなかった。これらの細菌は同処理場の晴天時下水、沈砂池汚泥においてもそれぞれ、6.1、9.4、13.8% および 5.1、11.3、10.6% と主要な菌種であった (図3)。

雨天時試料において平均 0.5% 以上存在していた細菌の中では *Flavobacteriaceae* 科細菌 (雨天時、晴天時それぞれ 11.13、4.53%) と *Rhodobacteraceae* 科細菌 (雨天時、晴天時それぞれ 0.42、0.16%) が処理場 A、B の両晴天時下水と比較しても有意に大きな割合を占めていることがわかった。

特に *Rhodobacteraceae* 科細菌は沈降汚泥中でも 3.7% と晴天時下水よりも大きな割合で存在しており、堆積物の再懸濁を示す指標となる可能性が示された。

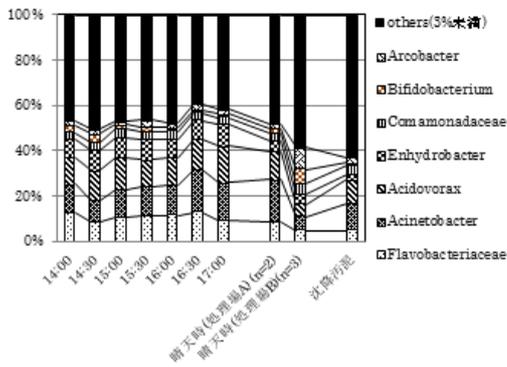


図3 雨天時および晴天時流入下水の微生物群集構造(雨天時試料中に3%以上存在した種を示す。)

一方、雨天時下水中における HSB と SRB はそれぞれ、 $8.8 \pm 4.3 \times 10^5$ 、 $2.0 \pm 0.6 \times 10^6$ copies/ml で、全細菌 16S rRNA 遺伝子コピー数の 0.07%、0.19% であった。雨天時の傾向として、SRB の値が常に HSB の値を上回っており、晴天時において HSB の方が SRB より多く存在していたことは異なっていた(図4)。さらに管路内堆積物と類似していると思われる沈砂池汚泥において SRB > HSB であったことから(図4)、雨天時下水において SRB が卓越したのは堆積物の再懸濁によるものと考えられた。

従来、堆積物の再懸濁を示す指標として SS が注目されてきたが、雨天時および晴天時において、SS に明確な違いはなかった。これに対し SRB/HSB の比は晴天時と比較して 3~8 倍と顕著な違いを示し、また時間変動も明確であったことから、管路内堆積物の再懸濁の指標として有効である可能性が示された。

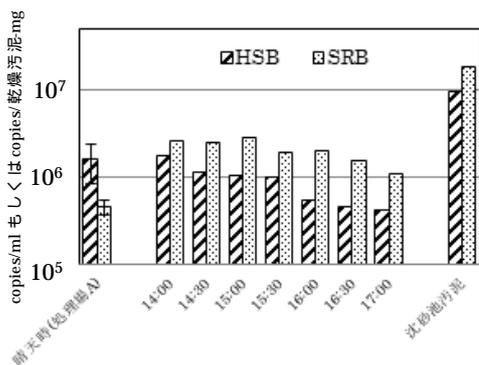


図4 雨天時下水および晴天時下水、沈砂池沈降汚泥における HSB、SRB の分布

(3) 雨天時越流水採取調査と雨天時後のお台場周辺域の水質調査
調査・実験方法

2014年6月5日~13日の降雨中・後において計6回の調査を行い、お台場海浜公園、隅田川河口、目黒川河口に加えて、東京港臨海部の2kmに渡る側線に沿って深さ方向に3か所で、水温と電気伝導度を観測するとともに、連続的に採水調査を行った(図5)。



図5 台場周辺海域における採水箇所

実験結果および考察

図6に、曳航連続採水の大腸菌濃度の結果を示した。6日と7日の中・底層の大腸菌濃度を比較すると、6日の時点では底層は表層より約2 log 低く、中層は表層と底層の間を変動しているが、7日では特に底層は1~2 log 上昇し、どの地点も 10^3 CFU/100ml 以上である。

また、7日から13日まで、大腸菌濃度の分布に大きな変化はなく、本調査期間では CSO 由来の汚濁物が断続的に供給されたことで、継続的な糞便汚染が起きたことがわかる。18日は、最後の CSO が発生したと考えられる12日の29mmの降雨から6日目にあたり、13日の大腸菌濃度に比べ表・中・底層において1 log 以上減少し 10^3 CFU/100ml 以下である。

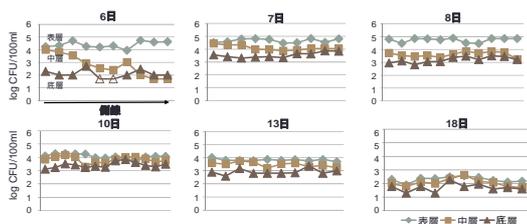


図6 東京湾沿岸域の曳航連続採水による測線3層の大腸菌濃度変化

糞便汚染微生物指標の濃度を測定結果、降雨終了後約1週間を経ても晴天時レベルまで落ちず、汚濁物が断続的に供給され継続的な糞便汚染が起きたことを把握した。

(4) 雨天時下水中と環境水中の病原微生物解析と糞便汚染の起源解析
調査・実験方法

お台場海浜公園において、降雨直前の2013年12月18日から降雨終了後一週間後の26日までの8日間のサンプリングを行った。サンプリング時刻は、11時、18時である。

大腸菌、大腸菌群、糞便性大腸菌群については、培養法でコロニー数を計数した。F 特異 RNA 大腸菌ファージについては、希釈

列での培養法と 100mL 法による計数も行った。ウイルス(G ノロウイルス、G ノロウイルス、アイチウイルス、トウガラシ微斑ウイルス(PMMoV)、腸管系アデノウイルス)については、Real-time PCR にて定量を行った。

実験結果および考察

計数の結果、大腸菌コロニー数と糞便性大腸菌群はほとんど同じように増減していることがわかった。また、大腸菌と糞便性大腸菌群の変動も類似していた。

図7に、調査期間におけるFファージ、ウイルス5種(G ノロウイルス、G ノロウイルス、アイチウイルス、トウガラシ微斑ウイルス(PMMoV)、腸管系アデノウイルス)の時系列変化を示した。PMMoV は定常的に高い濃度であることから、雨天による影響もほとんど受けていないと考えられる。このことから、PMMoV は東京湾沿岸域において、河川からの流入水の影響よりも元から沿岸域に含まれている量が支配的であると考えられる。

G ノロウイルス、アイチウイルス、腸管系アデノウイルスは降雨後の19日~24日の間に全体的に濃度が高くなっているが、大腸菌群ほど降雨による顕著な濃度の増減は見られなかった。

Fファージは大腸菌群のように降雨後に濃度が大きく増加した。しかし、大腸菌群とは違い、濃度が急激に減少するわけではなく、緩やかに減少した。Fファージと拳動の近いとされるウイルスもまた、不活化せずに生きている状態で沿岸域に存在していた可能性が考えられる。

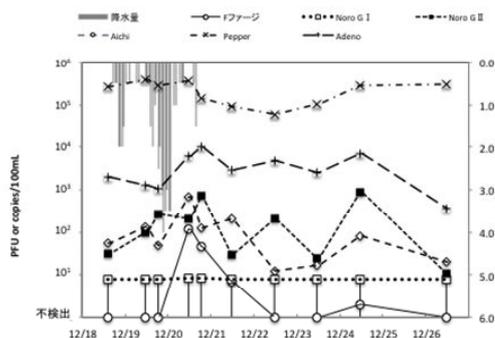


図7 Fファージとウイルス5種の時間変化

(5) 雨天時下水道汚濁流出の分布型下水道モデルによる雨天時下水道汚濁流出解析モデル解析方法

CSO 解析のために、排水区データ(流出係数、人口密度、汚水量・汚濁物質濃度)、下水管路網データ(管路情報、ポンプ・堰の情報)を反映させた分布型下水道モデルを、InfoWorks ICM(ver.5.0)を用いて構築した。さらに、排出されたCSOの河川流下過程を考慮するため、河川モデルと結合させた一体型モデルに改良した。なお、モデル解析では、降雨データ(降雨強度、降雨継続時間)や河口の潮位データなどを入力する必要がある。

実験結果および考察

異なる特性を有した降雨グループ(G1-G6)ごとに越流量および汚濁負荷量の推定を行った結果を図8に示した。年間で発生した越流量および汚濁負荷量と、各降雨グループが占める割合を示した。年間越流量に関しては、発生頻度の高いG3と、総降雨量の大きいG6が大きな割合を占めているが、越流負荷量に関しては、G3がG6の2倍以上を占めており、CSOの観点では非常に重要な降雨グループであることが明らかになった。

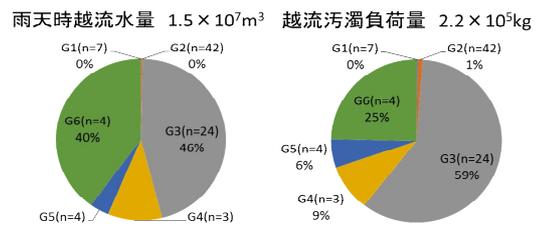


図8 年間越流量および越流負荷量に占める各降雨グループの割合(目黒川流域)

図9には、目黒川流域において発生したG3降雨(2007/3/11、総降雨量22mm)の降雨開始時刻を大潮の満潮時と干潮時に合わせて解析した際の、目黒川河口(図1右の地点)における水位と、河口から湾奥部へと流出した積算汚濁負荷量を示した。

大潮の満潮時に降雨が開始した場合、降雨時に下げ潮に伴い、約40%の汚濁負荷が河口から湾奥部へと流出する。一方で大潮の干潮時に降雨が開始した場合、降雨時には汚濁負荷が河口から湾奥部へと流出せず、降雨時の潮位の状況が負荷流出に影響を与えることが推定された。そして、降雨から6日経過しても、汚濁負荷が河川に残存していることが推定された。河口からの汚濁負荷流出に時間を要することには、基底流量と吐き口の位置が影響すると考えられる。

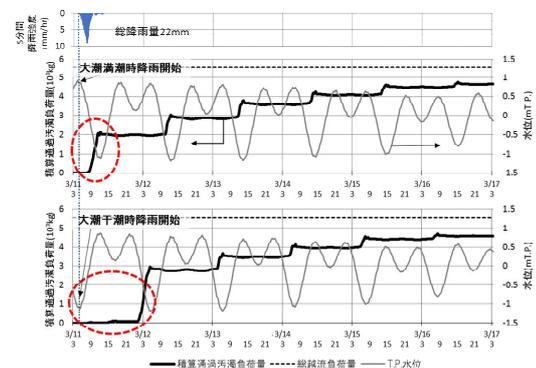


図9 降雨開始を大潮の満潮時と干潮時に設定した場合の積算通過汚濁負荷量の変化(目黒川、G3降雨)

(6) 3次元沿岸域流動水質モデルによる雨天後の水質予測シミュレーションとリスク低減対策の検討

調査・実験方法

2014年6月の豪雨後における台場周辺海域

の糞便汚染評価のため、3次元流動・水質解析モデルを用いて、ポンプ所や流入河川由来の汚濁負荷を受け、水平・鉛直方向に汚染が拡がる傾向をモデルにて再現計算する。

使用したモデルは、気象データやCSO排出などを含む境界条件を入力し、流動場の計算のもととなるナビエ-ストークスの式と連続式、物質挙動の計算のもととなる移流拡散方程式を座標系に変換し、計算することで、対象流域の塩分濃度や大腸菌濃度の変動を得ることができるモデルである。

実験結果および考察

小降雨における水質予測結果では、隅田川や目黒川からの負荷削減が有効であることを示した。一方、深さ方向採水調査を実施した豪雨の場合には、目黒川から河口から排出後すぐに南に流下することにより影響が低下することがわかった。

お台場海浜公園を取り囲む構造物の改変の影響を評価した結果を図10に示す。海浜公園内の1グリッドの全水深に存在する大腸菌負荷量の経時変化を示している。結果として、豪雨の場合には構造物自体は汚染レベルの低下に効力が無いこと、構造物を追加すると汚染レベルは低減するものの降雨後の濃度減少速度は遅くなることが予測できた。

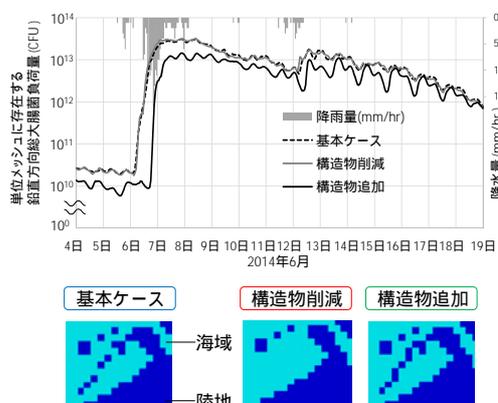


図10 構造物の有無による大腸菌負荷量経時変化の比較

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) Tomoyo Shibata, Keisuke Kojima, Sung Ae Lee and Hiroaki Furumai (2014) Model evaluation of faecal contamination in coastal areas affected by urban rivers receiving combined sewer overflows, *Water Science & Technology*, 70(3), 430-436. doi: 10.2166/wst.2014.225.
- 2) Akihiko Hata, Hiroyuki Katayama, Keisuke Kojima, Shoichi Sano, Ikuro Kasuga, Masaaki Kitajima and Hiroaki Furumai (2013) Effects of rainfall events on the occurrence and detection efficiency of viruses in river water

impacted by combined sewer overflows, *Science of the Total Environment*, 468, 757-763. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.093.

〔学会発表〕(計 16件)

- 1) Tomoyo Shibata, Rajendra Khanal, Sungae Lee, and Hiroaki Furumai: Model Prediction of E. coli Concentration in Coastal Areas Affected by Combined Sewer Overflows. 13th International Conference on Urban Drainage, 2014年9月7日~2014年9月12日, Kuching Sarawak (Malaysia)
- 2) 三上雄一郎, 栗栖太, 春日郁朗, 古米弘明: 雨天時下水中の微生物群集の時間変動と晴天時下水との比較, 第48回日本水環境学会年会講演集, p.438. 2014年3月19日~2013年3月21日, 東北大学, (宮城県・仙台市)
- 3) Tomoyo Shibata, Sungae Lee, Keisuke Kojima and Hiroaki Furumai: Model evaluation of faecal contamination in coastal area affected by urban rivers receiving combined sewer overflows, 5th IWA-ASPIRE, 10C2-6. (8-12 September, 2013, Daejeon, Korea)
- 4) 端昭彦, 片山浩之, 古米弘明: 大容量水試料濃縮手法を利用した東京湾沿岸域におけるウイルス汚染の実態調査, 第68回土木学会全国大会 2013年9月4日~2013年9月6日, 日本大学(千葉県・津田沼市)

〔図書〕(計 0件) なし

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件) なし
取得状況(計 0件) なし

〔その他〕

ホームページ等 なし

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

片山 浩之 (KATAYAMA, Hiroyuki)
東京大学大学院・工学系研究科・准教授
研究者番号: 00302779

(2) 研究分担者

栗栖 太 (KURISU, Futoshi)
東京大学大学院・工学系研究科・准教授
研究者番号: 30312979

(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・講師
研究者番号: 20431794