

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360238
 研究課題名（和文） 合流式下水道雨天時越流水由来の未規制リスク因子の受水域における挙動解析
 研究課題名（英文） Analysis of behaviors of nonregulated risk factors derived from combined sewer overflow in receiving water bodies
 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

研究成果の概要：

合流式下水道雨天時越流水（CSO：Combined Sewer Overflow）に含まれる未規制リスク因子（健康関連微生物、微量化学物質）に着目し、これらが受水域に流出した場合に、どのような挙動を示すのかを評価した。雨天後の東京湾において、未規制リスク因子を含めた汚濁物質の動態をモニタリングすると共に、CSOの東京湾への負荷経路として重要な隅田川に着目して、晴天時および雨天時に24時間の採水を行った。また、お台場周辺に特化した3次元流動モデルの精緻化を行い、大腸菌群の挙動を解析した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
年度			
年度			
年度			
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：(1)環境質定量化・予測 (2)土木環境システム (3)合流式下水道，
 (4)雨天時越流水 (5)受水域

1. 研究開始当初の背景

都市再生や都市環境インフラ再生の視点からも、大都市で整備されている合流式下水道システムが抱える問題点を解決することは非常に重要な課題である。合流式下水道雨天時越流水（CSO：Combined Sewer Overflow）や都市ノンポイント汚染水は、都市が抱える「複合汚染発生源」と考えられるが、未規制リスク因子を含むこれらの汚染が受水域に流出した場合の動態については十

分に明らかにされていない。東京湾沿岸域を例にとると、CSO由来の未規制リスク因子がどのような挙動を示し、お台場のような親水空間に影響を及ぼしうるのかを定量的に把握することが求められている。現在、大都市の下水道システムは更新時期を迎えつつあり、受水域における未規制リスク因子の動態も考慮に入れた上で、下水道システムの効率的な運用や雨天時汚濁負荷削減対策について評価することが求められている。

2. 研究の目的

合流式下水道雨天時越流水起因の汚濁問題に対処するには、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、未規制の健康関連微生物（ウイルス、腸管系ウイルスなど）や微量化学物質（医薬品や重金属など）によるリスクも評価する必要がある。しかしながら、これらの未規制リスク因子が排出先である受水域においてどのような動態を示すのかについては、ほとんど明らかになっていない。本研究では、合流式下水道雨天時越流水に含まれる未規制リスク因子の流出ダイナミクスと受水域における挙動の解明を目的とし、それらの発生源や負荷量の寄与度、親水空間でのリスクレベルについて把握することを試みる。

本研究により、雨天時越流現象発生後の受水域における健康関連微生物や微量化学物質の存在状態や挙動が定量的に解明され、体系だった現場調査に基づいたCSOモニタリングデータの蓄積が期待される。そして、類型化された発生活濁源や下水道運用を意識したCSO制御方法の可能性や課題を抽出することを旨とする。

3. 研究の方法

(1) 雨天時の東京湾沿岸調査の実施

平成19年11月10日の雨（総降雨量26mm）を起点とし、11月11日（雨天1日後）、12日（同2日後）、14日（同4日後）、21日（同11日後）、28日（同18日後）に、隅田川河口部から東京湾お台場周辺の沿岸域に至る7地点（図1）を対象として、採水を行った。採水にあたっては、干満の影響を見るために、1日2回の採水を行うとともに、深度方向の水質分布を把握するために、表層水、中層水、底層水の分析を行った。

現場では、水温、pH、塩分、電気伝導度、DOを測定した。一般水質項目として、SS、濁度、有機物（TOC、DOC）、窒素（TN、NH₄-N、

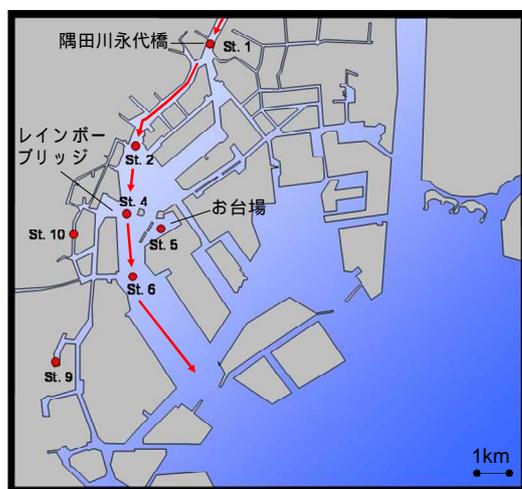


図1 東京湾サンプリング地点

NO₂-N、NO₃-N)、リン（TP、PO₄-P）を測定した。健康関連微生物として、大腸菌、大腸菌群に加えて、体表面吸着ファージ、F特異大腸菌ファージ、腸管系アデノウイルス、ノロウイルスG型/G型を測定した。重金属類の測定項目として、亜鉛、銅、ニッケル、鉛をICP-MSで測定した。なお、測定にあたっては、キレートディスクカートリッジを用い、重金属類の存在形態（フリーイオン態、錯体）についても解析した。CSO汚濁負荷に伴う沿岸域の微生物群集の挙動を把握するために、真正細菌の16S rDNA、真核生物の18S rDNAを標的としたT-RFLP解析を行った。孔径10μmのフィルターで捕捉した画分と、そのろ液を孔径0.2μmのフィルターで捕捉した画分について解析を行い、懸濁物の動態との関連性を考察した。

(2) 隅田川汚濁負荷モニタリング

隅田川永代橋（図1 St.1）において、晴天時、雨天時の水質の経時変化を把握するために、平成20年10月14日-15日（雨天時：総降雨量10mm）、10月22日-23日（晴天時）に、30分~1時間に1回の頻度で24時間連続して採水を行った。測定項目は、一般水質項目、健康関連微生物、重金属類である。同時に、隅田川白鬚橋に設置したドップラー流速計の情報を入手し、流速・流量を得た。

(3) リアルタイムコントロールの検討と沿岸域での数値シミュレーション

合流改善のための方策として、オンラインで施設運転を行うリアルタイムコントロール手法の適用が期待されている。本研究では、システム同定手法を応用して、オンライン流量・汚濁負荷量の予測モデルの検証を行った。

また、当該グループで過去に開発した東京湾お台場周辺海域の3次元流動モデルの改良を試み、平成19年11月9日から11月30日までの三週間の大腸菌群濃度についてシミュレーションを行った。本研究では、隅田川、ポンプ所からの汚濁負荷の与え方を特に改良した。

4. 研究成果

(1) 雨天時後の東京湾沿岸調査の実施 健康関連微生物の挙動

一般水質指標からは雨天時越流水の影響を伺うことは難しかったが、健康関連微生物指標からは雨天時越流が発生していることを強く示唆する結果が得られた。また、指標微生物である大腸菌群あるいは大腸菌と、他のウイルス類との間の相関性は低く、指標微生物からウイルス類の挙動を推測することには限界があることが示された。

図2に、St.1、St.4、St.5、St.6、St.9の表層における大腸菌濃度の推移を示す。St.1

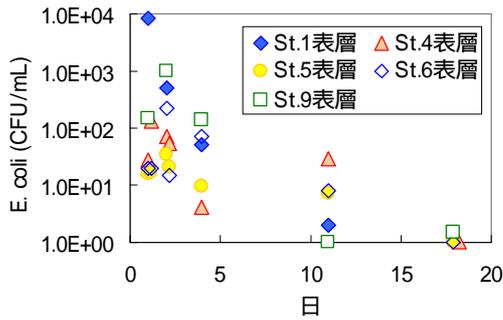


図2 各地点表層の大腸菌濃度の推移

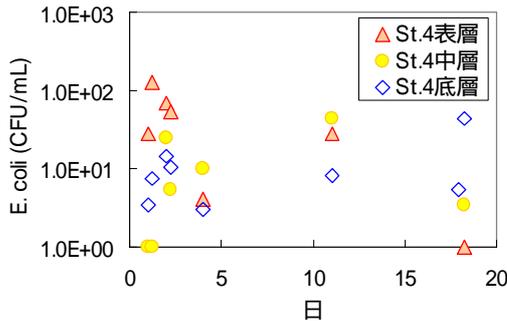


図3 St.4 深度方向の大腸菌濃度変化

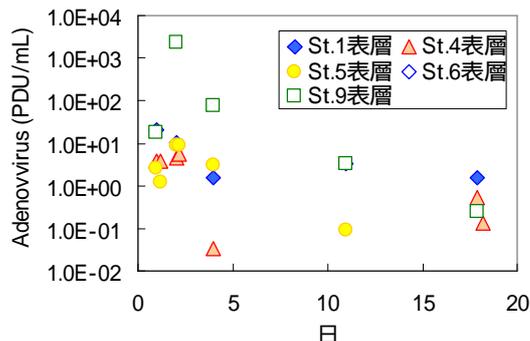


図4 各地点表層のアデノウイルス濃度の推移

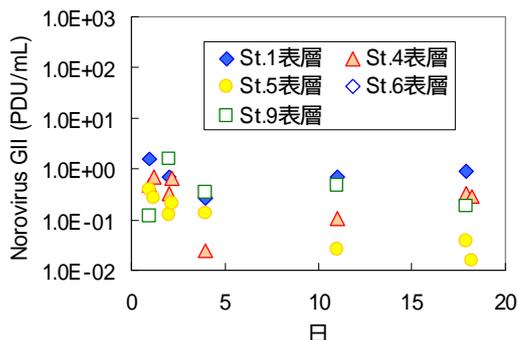


図5 各地点表層のノロウイルス GII 型濃度の推移

の雨天 1 日後では 8650(CFU/mL)の高濃度の大腸菌が検出されたが、2 日後には 1.2log 落ち、雨天 18 日後には、3.9log 低下して 1(CFU/mL)を示した。東京湾内の地点において、最高濃度を示したのは、ST.4 では雨天 1 日後であったが、St.5、St.6、St.9 では雨天 2 日後と時間差が確認され、大腸菌の負荷経

路、湾内での挙動を考える上で興味深い知見となった。

図 3 には、St.4 における深度方向の大腸菌濃度の変化を示す。雨天 2 日後までは、表層の大腸菌濃度が最も高かったが、4 日後以降は、中層や底層の方が濃度が高く検出されており、深度方向に大腸菌が分散していったものと推測された。また、潮汐の影響で、同日のサンプリングであっても、干潮時と満潮時とでは、大腸菌濃度に最大で 7 倍近くの差異が生じることも明らかとなり、挙動の把握にあたっては、干満の影響も無視できないことが示された。

ウイルス類の測定結果の例として、図 4 にアデノウイルス、図 5 にノロウイルス GII 型の結果を示す。St.1 におけるアデノウイルスの濃度は、雨天 1 日後の 21(PDU/mL)から 2 日後には 10(PDU/mL)に半減し、4 日後には 1(PDU/mL)にまで低下した。St.4 や St.5 では雨天 4 日後までは検出されたが、それ以降はほぼ検出されなくなり、比較的速やかに消滅することが示唆された。St.9 では、雨天 1 日後よりも、2 日後に最大値 2273(PDU/mL)を示したが、11 日後には 3(PDU/mL)にまで大きく低下し、濃度変動が大きいことが示された。一方、ノロウイルス GII 型については、他の指標で見られたような顕著な濃度減衰は見られなかった。これらの結果は、健康関連微生物の種類によって、発生源からの負荷経路や東京湾内での挙動に差異があることを示しており、大腸菌などの一律の指標だけでリスク管理をすることには限界があることが明らかになった。

重金属の挙動

重金属類の測定結果の一例として、各地点表層における全亜鉛の濃度変化を図 6 に示す。雨天 1 日後では、運河地帯である St.9 において 54.5 $\mu\text{g/L}$ 、St.10 において 40.1 $\mu\text{g/L}$ と高濃度を示した。隅田川流入地点の St.1 では、34.5 $\mu\text{g/L}$ であった。これに対して、東京湾内の St.2、St.4、St.5、St.6 における濃度範囲は 5.2~14.8 $\mu\text{g/L}$ であった。雨天 2 日後になると、St.1、St.9、St.10 における濃度は半減し、St.1 および St.9 では大きな濃度変動が見られなくなったが、St.10 では雨天 4 日後に濃度が再上昇するという変化を見せた。東京湾内の地点では、地点ごとに異なる濃度変動を示した。St.4、St.5、St.6 では、雨天 18 日後の全亜鉛濃度が、雨天 1 日後よりも大きく上昇する傾向が観察された。

深度方向の濃度プロファイルについては、地点ごとに異なっていたが、たとえば St.4 の場合、雨天 1 日後から 2 日後までは表層の濃度がもっとも高かったが、雨天 4 日後には底層濃度が最大となった。11 日後には表層および底層が 9 $\mu\text{g/L}$ 程度であったのに対して、中層濃度が 23.3 $\mu\text{g/L}$ に増加した。雨天 18 日後には、表層から

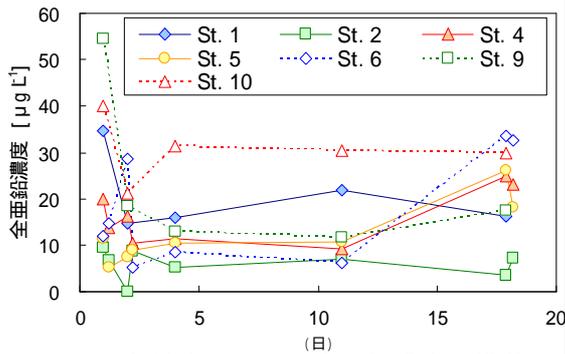


図 6 各地点における全亜鉛濃度の推移

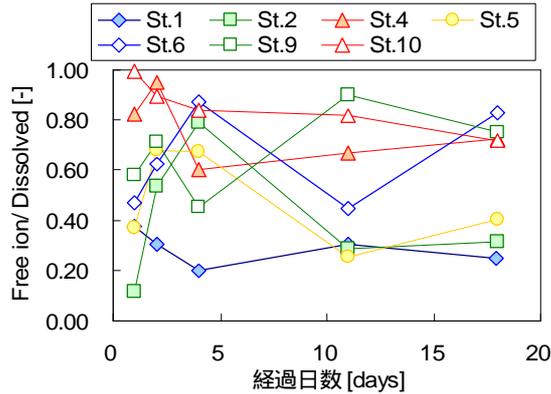


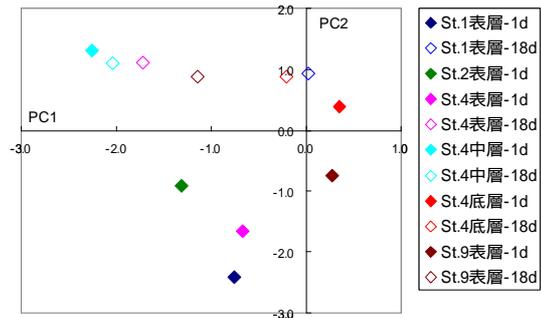
図 7 溶存態に占めるフリーイオン態亜鉛の割合

底層まで 25 µg/L 程度になり濃度勾配は解消していた。

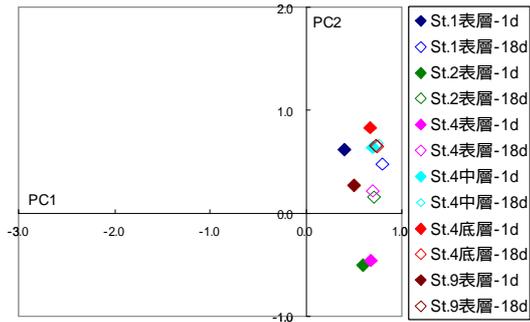
図 7 に、溶存態亜鉛に占めるフリーイオン態亜鉛の割合(各地点表層試料)を示す。隅田川の流入水(St.1)は、他の地点と比較して、フリーイオン態亜鉛の占める割合が低く、安定錯体を形成している亜鉛が相対的に多いことが読み取れる。それに対して、運河地帯の St.9 および St.10 では、フリーイオン態の割合が高かった。St.9、St.10 では、濃度自体も高いことから、生態毒性の観点から重要な負荷源であると考えられる。湾内の各地点については、地点ごとに異なる傾向を示したが、St.2 や St.5 では雨天 2 日後から 4 日後にかけてフリーイオン態亜鉛の割合が増加した後、低下するという変動が観察された。

真正細菌群集構造の変動

真正細菌群集の T-RFLP 解析の結果の一例を図 8 に示す。図 8 では、a) 10 µm 以上の画分、b) 0.2-10 µm の画分について得られた T-RFLP プロファイルの主成分分析によって解析し、主成分得点を二次元にプロットした。図 8 の a) と b) を比較すると、10 µm 以上の画分の群集構造は、雨天 1 日後と 18 日後とでは大きく変化したのに対して、0.2-10 µm の画分の群集構造は、1 日後と 18 日後の変動は小さいことが読み取れる。このことは、雨天時の汚濁流出に伴って、懸濁態粒子



a) 10 µm 以上の画分



b) 0.2-10 µm の画分

図 8 真正細菌群集構造 (a: 0.2-10 µm の画分、b: 10 µm 以上の画分) の 16S rDNA T-RFLP プロファイルの主成分分析 (主成分得点のプロット)

に付着した微生物が東京湾に流入し、湾内の微生物群集構造に攪乱を及ぼした可能性を示唆している。群集構成を解析することにより、糞便に特異的に存在する微生物が、10 µm 以上の画分に存在することが明らかになれば、汚水由来の微生物の動態がより明らかになると期待される。

(2) 隅田川汚濁負荷モニタリング

隅田川は流域内に多数の雨水吐、ポンプ場、下水処理場を抱えており、東京湾への CSO 汚濁負荷の主要経路と考えられる。

健康関連微生物の挙動

健康関連微生物の晴天時の動態を図 9 に、雨天時の動態を図 10 にそれぞれ示す。晴天時と雨天時を比較すると、雨天時には、大腸菌、大腸菌群濃度が上昇する傾向が見られた。一方、体表面吸着ファージ、ノロウイルス、アデノウイルスなどのウイルス類については、雨天時であっても濃度上昇は見られず、濃度レベルも晴天時と差異がほとんどなかった。健康関連微生物の種類によって濃度変動に差異が見られるのか、今後の課題として解明することが必要である。

重金属の挙動

重金属類については、晴天時と雨天時で濃度レベルは、ほとんど変化なかったが、Cu と Zn では降雨初期時の濃度が高い傾向が見

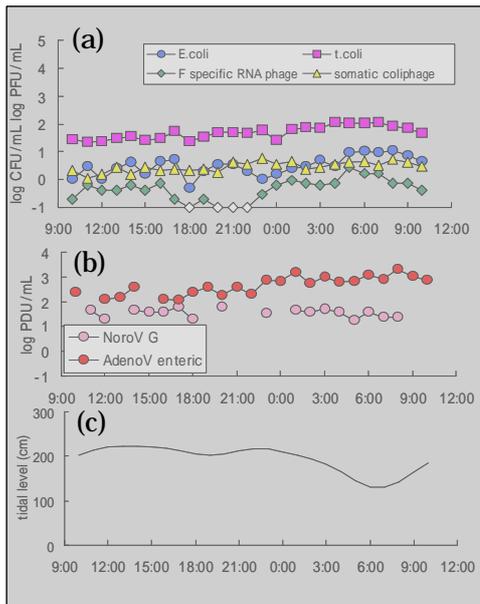


図 9 晴天時隅田川における健康関連微生物の濃度変動：(a) 大腸菌・大腸菌群・体表面吸着ファージ・F 特異大腸菌ファージ、(b) ノロウイルス GII・アデノウイルス、(c) 潮位と降水量

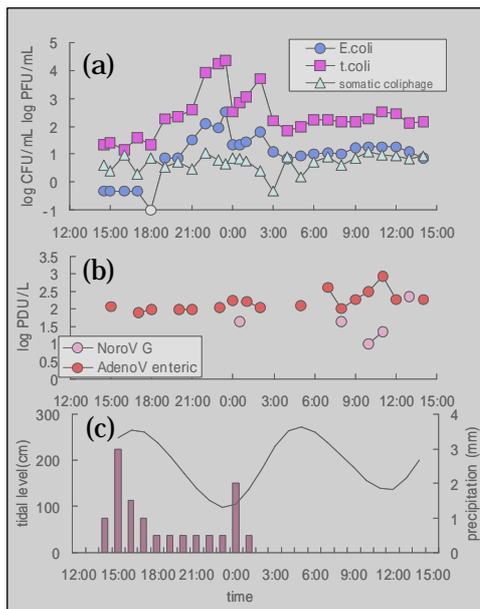


図 10 雨天時隅田川における健康関連微生物の濃度変動：(a) 大腸菌・大腸菌群・体表面吸着ファージ、(b) ノロウイルス GII・アデノウイルス、(c) 潮位と降水量

られた。図 11 に晴天時の亜鉛の濃度変化、図 12 に雨天時の亜鉛の濃度変化をそれぞれ示す。晴天時では、全亜鉛濃度は 15.5 ~ 24.4 $\mu\text{g/L}$ 、溶存態亜鉛濃度 11.4 ~ 21.0 $\mu\text{g/L}$ 、フリーイオン態亜鉛濃度 7.7 ~ 15.1 $\mu\text{g/L}$ の間の値を示した。流量の変化との間には明瞭な

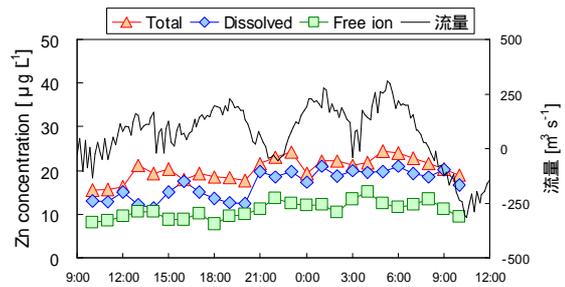


図 11 晴天時隅田川亜鉛濃度の変動

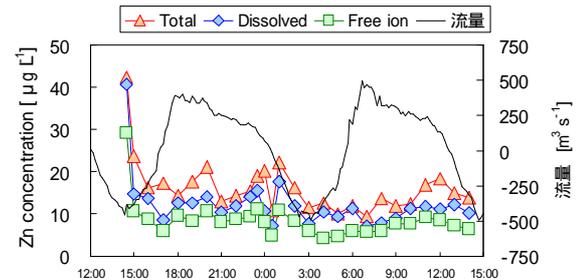


図 12 雨天時隅田川亜鉛濃度の変動

関連性は認められなかった。一方、雨天時では、全亜鉛濃度は 9.3 ~ 42.4 $\mu\text{g/L}$ 、溶存態亜鉛濃度 7.1 ~ 40.7 $\mu\text{g/L}$ 、フリーイオン態亜鉛濃度 4.3 ~ 29.1 $\mu\text{g/L}$ と濃度変動の幅が広がった。特に、雨天時調査のサンプリング開始時点の濃度が最も高く、ファーストフラッシュなどの路面排水等の影響を受けていることが想定される。なお、溶存態亜鉛のうち、フリーイオン態の占める割合は、晴天時および雨天時ともに大きな差異はなく、平均すると 7 割程度であった。

(3) リアルタイムコントロールの検討と沿岸域での数値シミュレーション

リアルタイムコントロールの検討

初期損失や浸透能を加味したシステム同定手法を用いて雨水越流回数を予測したところ、実際の越流回数の 86% をとらえることに成功した。また、負荷量については、10 分先予測が可能であることを確認し、リアルタイムコントロールの適用可能性を評価することができた。

沿岸域での数値シミュレーション

東京湾における汚濁物質の動態モデルについては、隅田川およびポンプ所からの汚濁負荷量（大腸菌群）の与え方を改善した。隅田川からの大腸菌群の入力値については、実測値（雨天 1 日後、2 日後、4 日後、11 日後、18 日後）の濃度変化を指数関数で近似して入力値とした。また、ポンプ所の排水面積について、処理実績に応じて排水面積を按分した。

シミュレーションの結果、St.2、St.4、St.6

の表層、中層、底層において、ほぼ実測データに近似した出力が得られること、潮汐によって大腸菌群がダイナミックに移動することが明らかになった。お台場周辺海域の大腸菌群濃度に最も影響を与える負荷源は、計算上、隅田川の影響よりも下水処理場からのCSOの寄与が大きいことが示された。

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)

金元載、古米弘明、真名垣聡、中島典之、合流式下水道小排水区における晴天時下水の濃度と負荷量の時間変動特性評価、下水道協会誌、45巻、135-146、2008、査読有

長岩明弘、古米弘明、中島典之、斗成聡一、上流管路の水質を時系列入力情報とした合流改善のためのオンライン負荷量予測モデルの検討、用水と排水、49巻487-494、2007、査読有

[学会発表](計 9件)

小島啓輔、春日郁朗、栗栖太、古米弘明、都市活動に由来する亜鉛の存在形態評価、第26回PFシンポジウム、2009/3/25、筑波

小島啓輔、春日郁朗、古米弘明、栗栖太、X線吸収微細構造解析を用いた下水道管渠内堆積物及び道路塵埃中の亜鉛の存在形態評価、第43回日本水環境学会年会、2009/3/16-18、山口

小島啓輔、春日郁朗、栗栖太、古米弘明、下水道管渠内堆積物中重金属の存在形態評価への蛍光XAFSの適用、PF研究会、2009/3/10-11、つくば

小島啓輔、春日郁朗、古米弘明、栗栖太、合流式下水道管渠内堆積物の重金属含有量とその存在形態評価、第45回環境工学研究フォーラム、2008/11/28-30、大阪
片山浩之、端昭彦、春日郁朗、真名垣聡、大垣眞一郎、降雨後の東京湾沿岸域におけるウイルス及び指標微生物の消長、第63回土木学会年次学術講演会、2008/9/10-12、仙台

Jin-Yong Kim, Hiroaki Furumai, Fumiyuki Nakajima, and Futoshi Kurisu, Advanced estimation of rainfall loss considering detailed distribution of urban surfaces classified by reflectance spectra of IKONOS satellite imagery, 11th International Conference on Urban Drainage, 2008/8/31-9/5, Edinburgh, UK
Weon-Je Kim, Satoshi Managaki, Hiroaki Furumai, Fumiyuki Nakajima, Simulation of the behavior of indicator

microorganisms in combined sewer system, 11th International Conference on Urban Drainage, 2008/8/31-9/5, Edinburgh, UK

長岩明弘、古米弘明、合流改善を目的とした施設運転におけるオンライン流量予測も出るの適用性評価、第45回下水道研究発表会、2008/7/22-24、横浜

金鎮英、塚本幸太郎、古米弘明、衛星画像と都市計画地理情報を用いた地表面の詳細分類と雨水流出解析への適用、第45回下水道研究発表会、2008/7/22-24、横浜

[図書](計 1件)

Hiroaki Furumai, Springer, 2. Urban water use and multifunctional sewerage systems as urban infrastructure In Urban Environmental Management and technology, cSUR-JT series, 29-46, 2008

[その他]

<http://www.env-u-tokyo.jp/2009/04/post.html>

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

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

(3) 連携研究者

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

鯉淵 幸生 (KOIBUCHI YUKIO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師
研究者番号: 60349800

藤田 昌史 (FUJITA MASAFUMI)
筑波大学・工学部・講師
研究者番号: 60362084

春日 郁朗 (KASUGA IKURO)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 20431794

益永 茂樹 (MASUNAGA SHIGEKI)
横浜国立大学・環境情報研究科・教授
研究者番号: 50282950