

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：53601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K11684

研究課題名（和文）カンボジアを例とした科学的根拠に基づく効率的な水域モニタリング手法の開発

研究課題名（英文）Development of efficient water monitoring methods based on environmental dynamics of semi-volatile organic pollutants in environmental water in Cambodia

研究代表者

酒井 美月（Sakai, Mizuki）

長野工業高等専門学校・都市デザイン系・教授

研究者番号：50418688

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：プノンペン市近郊の水域を対象に、2011、2018、2019年に河川、廃水、雨水を対象に試料を収集し、約1000種類の有機微量汚染物質を一斉分析した。経過時間による検出状況を変化および季節変化を確認するとともに、検出された微量汚染物質を使用形態ごとに分類し汚染源を対象に、主成分分析（PCA）とクラスター分析を実施した。結果から4つの主要な主成分が明らかになり、都市下水では複合汚染スコアと家庭由来汚染スコアが高く、これは季節を問わず共通の傾向であった。しかし、河川水は採取年度により工業物質や大気物質の主成分スコアが高く季節による特性が微量汚染物質の検出状況と濃度に影響を与えることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

経済発展、人口増加の著しい地域における下水と河川水中の化学物質種の網羅調査にて、下水、河川水、雨水ともに多くの物質が検出された。経時による変化では、下水、河川水ともに総濃度は上昇しており、経済発展によって使用される化学物質の量が増えていることが示唆される。季節による変化では、単純な流量の増加だけでなく、季節ごとのライフスタイルの違いが河川の水质に影響を及ぼしていることが確認された。多変量解析により各地点の汚染原因を把握することが出来、採水地点ごとの重要度を明らかにできた。本研究によって得られた結果は、環境水における管理のための監視地点・対象物質の選定に資するものとなった。

研究成果の概要（英文）：Water samples were collected from rivers, wastewaters, and rainwater around Phnom Penh in 2011, 2018, and 2019, and analyzed for approximately 1000 organic micropollutants. The micropollutants were categorized by their usage type to derive the pollution source, and principal component analyses (PCA) and cluster analyses were performed. The analyses revealed four major principal components whose eigenvalues were more than one. In urban sewage, complex and household-derived pollution scores were high, which was a common tendency regardless of season. However, the main component score was high for industrial and atmospheric substances in river water, which differed spatio-temporally. The results suggested that the differences in hydrological characteristics between seasons influence the presence and concentration of micropollutants.

研究分野：環境水工学

キーワード：微量汚染物質 網羅分析 カンボジア 水质 起源解析

## 1. 研究開始当初の背景

私たちは多くの化学物質を利用することによって、より利便性の高い生活を享受しているため、人口の増加や地域における経済の発展に伴い、使用される物質の種類や量が増大する。人が利用した化学物質は環境中に放出される。水域もその影響を受けるが、発展途上国では十分な下水処理施設を持たない国も多い。また河川水が直接生活水となるなど水域の汚染による生活への影響が大きいため状況の把握が急務である。カンボジアはインドシナ半島に位置する発展途上国である。現在急激な高度経済成長を遂げており、2011年～2019年には7%前後の経済成長率を維持し、2020年には新型コロナウイルスの影響もあり成長率が落ち込んだものの、回復後はプラス成長が見込まれている<sup>1)</sup>。人口増加も著しく、2010年～2020年の9年間では国全体での人口が約17%増加しており、人が都市部に移動し都市化が進んだことで首都プノンペンでは人口が約1.3倍に増加している<sup>2)</sup>。既往の研究<sup>3)</sup>において、2011年雨季にカンボジア国内の環境水にて網羅分析を実施したところ、日本やベトナムと同等の種類化学物質が検出された。しかし、国内において調査を行っているカンボジア環境省では、多数の化学物質の環境挙動を網羅できるような分析環境がなくカンボジアの河川において一斉分析を行った報告例は以降行われていない。本研究により、水域での化学物質の状況を把握し、経済成長や、特有の季節変化による汚染状況を把握する必要があった。

## 2. 研究の目的

本研究はカンボジアにおける環境水の化学物質管理の基礎データとなる情報を得ることを目的とし、以下の内容で実施した。

近年の急激な経済発展及び人口集中が著しいカンボジアの首都プノンペン近郊として、下水、河川水、雨水の調査を実施する。化学物質の網羅分析を経時的に行い、その種、および量の増減について把握する。加えて河川環境の変化を踏まえた検討を行うため、一水年における雨季・乾季の比較も行い、それぞれにおける検出物質の違い、周辺環境の変化による影響を検討する。また、各年で検出された物質において、生態に対するリスク評価を行った。

## 3. 研究の方法

### 3-1. 調査対象地域および地点

カンボジア国内には、ラオス国境から国内を縦断しベトナムに抜けるメコン川と、トンレサップ湖からベトナムに抜けるトンレサップ川の2つの大河川が流れている(図1)。メコン流域は季節風の影響を受け、その水位や流量は、雨季である5月末から10月にかけて最高を記録し、乾季の末の5月頃には最低を記録する。カンボジアでも雨季に年間総雨量の90%が降り、河川及び湖沼の流況は季節によって大幅に異なる。メコン川は雨季と乾季で流量を10倍以上変化させ、乾季にはトンレサップ湖の湖水は市街地を通過してメコン川と合流しバサック川、メコン川へと流下していくが、雨季は逆向きであり、メコン川から都市部を経由してトンレサップ湖に流入する。

本研究では下水・河川水・雨水の3種類の環境水を対象とした。プノンペン市近郊の試料採取地



図1 対象河川位置

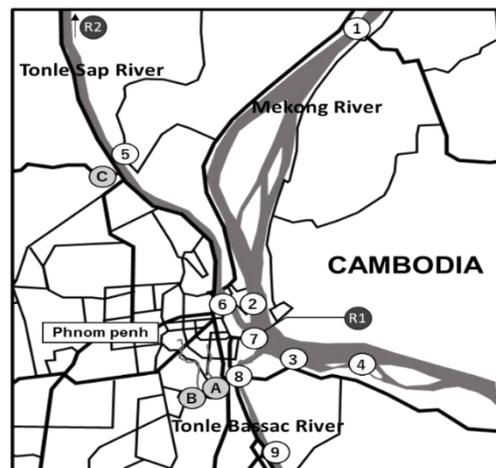


図2 調査対象地点

点を図2に示す。下水試料は家庭で使用された下水を集めるポンプ場の試料を都市部の2地点と郊外の1地点の計3地点(A, B, C)で、河川水試料は4河川の計9地点(①~⑨)で採取した。雨水は首都プノンペンと首都から北西に位置するシェムリアップ州の計2地点(R1, R2)で採取した(図2)。雨季の2011年9月と2018年9月、乾季の2019年3月に、のべ30試料を採取した。

### 3-2. 分析方法及び解析方法

河川水は、河川流央より採取用器あるいはドローンを用いて250ml~500ml採取した。雨水は雨水採取装置に調査時に採取されていたものを対象月の試料として取得し、下水は集水路末端のポンプ場からドローンにて採取した。試料の分析には一斉分析法を用いた。試料水250-500mLをジクロロメタンでの液々抽出あるいは固相により抽出し、ヘキサン転溶し濃縮後、内部標準液を加え測定用試料とした。GCMS法にて最大1072種の半揮発性有機汚染物質を同時分析した<sup>4)</sup>。検出された化合物の同定は、標準物質を保有していなくても同定定量が可能である自動同定定量データベース(AIQS-DB)を用いた。n-Alkanes, PAHs, Sterols, 農薬類, などの物質が登録されているSCANモードのデータベースを軸に、より低濃度での検出が予想され重要度が高いPAHs, SterolsをSIMモード、さらに高感度での分析が必要なPOPsはSRMモードで分析を行う。そのため分析結果はSRM, SIM, SCANの順で優先的に採用した。

## 4. 研究成果

### 4-1. 分析結果の概要

調査期間に共通して測定し、コンタミが考慮される物質を除いた913物質を対象とし、その使用用途別に17分類(殺菌剤, 除草剤, 殺虫剤など)、さらに由来別に3分類(Agriculture, Business and household, Industry)した。なお、ステロールは多くの地点で高い濃度で検出されたため、分けて表示した。下水, 河川水, 雨水試料のうち、対象である913物質中211物質が検出された(表1)

濃度の範囲は下水で5.25~598µg/L(平均値355µg/L), 河川水で1.58~76.6µg/L(平均値15.7µg/L), 雨水で10.5~27.9µg/L(平均値19.2µg/L)。検出数の範囲は下水で22~100(平均値72), 河川水で22~63(平均値39.0), 雨水で63~74(平均値68.5)であった。下水は河川水や雨水の総濃度の20倍以上あり、検出数は約2倍であった。河川水からも多くの物質が検出され、人々の生活あるいは生産活動により使用された化学物質が下水に集まり、希釈されつつも河川水にも影響を与えていることが示唆された。

また、カンボジアの水質・排水基準などを定めた「Sub-decree on Water Pollution Control, 1999(水質汚濁防止に関する政令)」で指定されている物質の基準値を超えているものは確認されなかった。

### 4-2. 経時による変化の検討

2011年と2018年の雨季に共通して採取した、A, B, ①, ⑤を対象として比較を行った。各地点の総濃度と検出数を図3に示す。検出数は下水, 河川水ともに経時によって減少しているが、総濃度は上昇しており、特定の物質の濃度の上昇が示唆される。下水では、総濃度に占める割合は、ステロール, 家庭由来の物質, 工業由来の物質の順に高く、農業由来の物質の割合は低い。経時による総濃度の上昇がみられ、ステロールの増加が寄与している。同年においてはA, B地点で検出数, 総濃度の傾向が類似しており、都市下水としての地点差は大きくないことが確認された。河川水では、家庭由来の物質が総濃度の9割近くを占めており、経時による濃度の上昇も、家庭由来の物質の増加が起因している。総

表 1

Origin	Category	対象物質(検出数)
Agriculture (農業由来)	殺菌剤	116(5)
	除草剤	117(12)
	殺虫剤	182(17)
	その他農薬	34(3)
Business and Household (家庭由来)	酸化防止剤	8(5)
	可塑性	11(8)
	パーソナルケア製品	18(10)
	消毒剤	3(3)
	タイヤからの溶出	23(17)
	石油	25(25)
	その他家庭由来	79(29)
Industry (工業由来)	溶媒	16(3)
	多環芳香族炭化水素	45(26)
	薬品の中間体	96(31)
	その他工業由来	116(4)
Sterol	ステロール	9(9)
Others	その他	15(4)
Total		913(211)

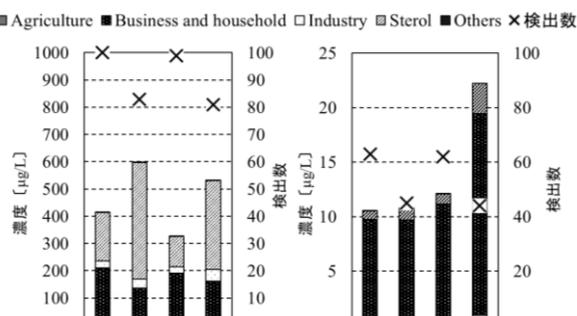


図3 用途別濃度と検出数の経時変化

濃度の上昇は特に⑤において顕著で、雨季において⑤は①の下流にあたり、市街地を通過したためだと考えられる。経時による物質群の変化を検討するため、2018年/2011年を求めた(図4)。河川水では増減傾向が一致している群もあるが、①では減少傾向の物質も多い。⑤では増加傾向の物質が多く、増加の一因となっているのは農薬、消毒剤、石油に由来する成分、ステロール類で特に家庭由来の物質で最も変化率が大きい。家庭由来の物質は人間の生活に起因し、経済発展による、ライフスタイルが変化も一因とっていると示唆される。さらに人口が増加したことにより、その変化が顕著に表れたと考えられる。下水では地点による傾向が明確になり、Aにおいては家庭由来の物質の増加傾向が大きく、Bにおいては農業および工業由来の物質の増加傾向が大きくなった。市街化、人口の増加は河川沿いから内陸へと広がっているが、下水集水場の配置から、Aでより人の生活に起因する物質を含む下水を集めており、影響が顕著に発現したと考えられる。

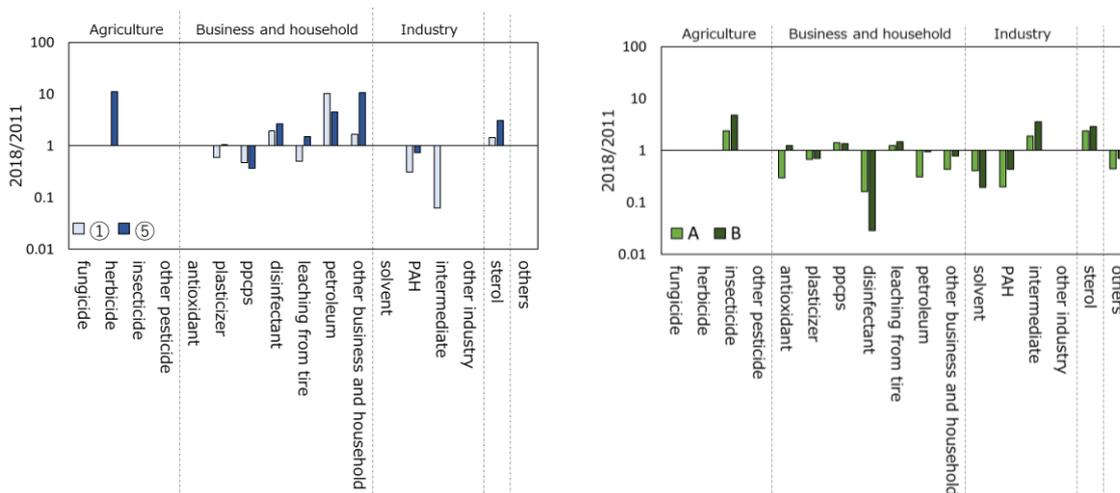


図4 用途別濃度の経時による増減率(2018/2011) 左:河川水, 右:下水

#### 4-3. 季節による変化の検討

2018年9月(雨季)と2019年3月(乾季)における下水(A, B, C), 河川水(①~⑨)を対象として比較を行った(図5)。下水, 河川水ともに雨季には総濃度, 検出数ともに高い地点が多く見受けられる。下水においては, 総濃度の地点間傾向は季節で変化しない一方で, 河川水は大きく異なった。また, ①と⑤地点のみ乾季で雨季より濃度が高いという結果になり, 点源汚染の影響も懸念されるため, 検出物質の発生源の検討が必要である。河川水を対象に, 由来別に総濃度に占める濃度割合を確認し, 雨季は, ほとんどの地点で家庭由来の物質が7~8割を占めていた。続いて工業由来の物質が多く検出されており, 降雨によって排ガス由来の物質などが流入していることが示唆される。また, 乾季に比べて, ステロールの検出も多く, 自然浄化では処理しきれなかった未処理の下水などの流入も考えられる。乾季では, 農業由来や工業由来の物質も多く検出されており, 雨季に比べ地点ごとの検出物質種のばらつきも大きい傾向にあった。降雨量の増加に加え, 物質ごとの流出特性が異なることや, 雨季と乾季の生活様式の違いが河川の水質に影響を及ぼしていると考えられる。

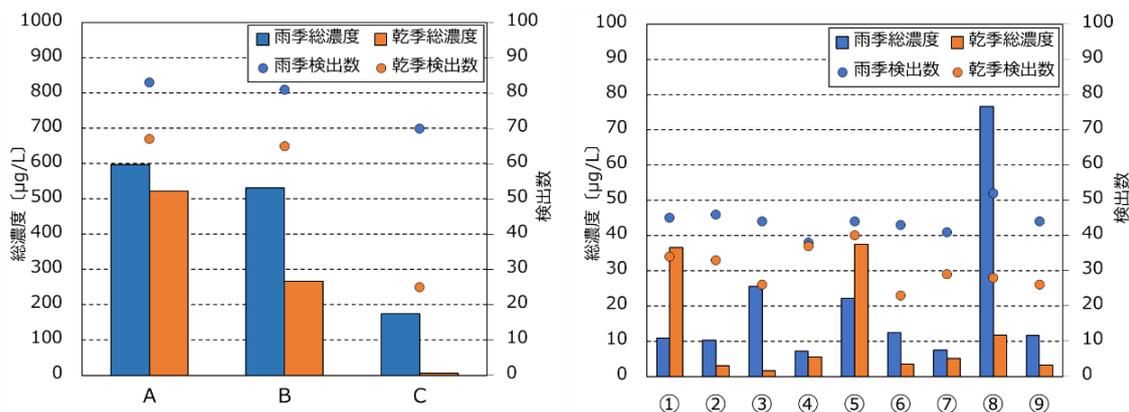


図5 雨季と乾季の総濃度および検出数(左:下水, 右:河川水)

えられる。雨水の分析結果ではこの季節変化を裏付けるように、総濃度の大半を占める化学物質は家庭由来の物質で、可塑剤、タイヤからの溶出、石油などの割合が高く、工業由来では薬品の中間体が多く検出された。都市部である R1 の総濃度 (27.9 $\mu\text{g/L}$ , 検出数: 62) は、郊外である R2 の総濃度(10.5 $\mu\text{g/L}$ , 73)と比べて、2.6 倍以上高く、同年の河川水 (①: 10.5 $\mu\text{g/L}$ , ⑤: 12.1 $\mu\text{g/L}$ ) と比べても約 2 倍以上高かった。検出数はどちらも同年の河川水と同程度であった。

#### 4-4. 多変量解析

検出物質を使用用途別に 17 分類しこれを対象にクラスター分析および主成分分析を行った。

【クラスター分析結果】全試料を対象とした分析の結果下水と河川水が有意に分離されていた。同年の AB の下水が同じクラスターに分類されており都市下水としての差は小さいことがわかった。また、2011 年雨季に測定した雨水 (R1, R2) は同年、または 2018 年雨季の河川水と同じクラスターに分類された。これにより、雨水と河川水の検出物質は似た傾向があることが明らかになり、河川水が雨水の影響を受けていることも示唆される。

【主成分分析結果】固有値が 1.0 以上の 4 つの主成分が得られ、累積寄与率は 83%であった。主成分 1 は、タイヤからの溶出、PPCP, などのほとんどの変数で負荷量が大きく、総合的な汚染を表していた。主成分 2 は、家庭由来の物質を表していた。そのため、都市部の下水においては主成分 1, 2 の主成分得点が高い傾向にあった。主成分 3 は農薬類や動物系ステロールに関連していた。主成分得点が高かったのは、2018, 2019 年の都市下水と①, ⑦, ④の河川であった。主成分 4 は工業由来の物質や PAH をはじめとする、大気中の堆積物が起源であり、主成分得点は各年の下水 (D) と 2018 の⑨, 2019 年の④, ⑦で高い傾向にあった。

#### 4-5. 生態リスク評価

すべての試料を対象として PNEC の値と比較を行った。検出濃度を PNEC の値で除したものを 30 試料のすべての試料において求めた。本研究で対象とした 30 試料からは 913 の化合物のうち 21 の化合物が PNEC の基準値を上回って検出された。下水においては、多くの物質が基準を超えて検出されており、雨季である 2011 年 9 月と 2018 年 9 月により多く検出されている。

特に 2011 年の A においては、Permethrin 2, Bis(2-ethylhexyl)phthalate, Anthracene が基準値の 20 倍を超えて検出されている。A はすべての年で、同様に都市下水である B よりも PNEC 値を上回る物質が高濃度で検出されており、より多くの下水を集めていることが示唆される。

河川水・雨水では家庭由来の物質と一部の農業由来の物質が基準値を上回って検出された。特にトンレサップ川の⑤ではすべての年でその傾向があり、かつ高濃度であることから、トンレサップ湖での未処理の生活排水の影響が示唆される。Bis(2-ethylhexyl) phthalate, Di(2-ethylhexyl)adipate などの家庭由来の物質はすべての年において高頻度で基準を上回り、検出傾向の高い要監視物質として特定される。一方で、農業由来の物質は年によって検出傾向とその濃度が異なった。下水・河川水・雨水ともに、年度や季節により、生態系に影響を及ぼす可能性がある物質の検出濃度は異なるものの、傾向は類似しているため、管理を必要とする物質の特定は可能であることが示唆される。カンボジアの河川は特に生活用水として利用される割合が高いため、影響が大きい物質の検出地点、時期対し定期的な監視が必要であると明示できた。

#### 参考文献

- 1) Digima 2020 年版 カンボジア経済の最新状況  
<https://www.digima-japan.com> (Retrieved on September 1,2021)
- 2) GLOBAL NOTE カンボジア 総人口(世界銀行統計)  
<https://www.globalnote.jp> (Retrieved on September 1,2023)
- 3) Him Chandath et al. ; Environmental survey on organic micropollutants in rain, river and waste water samples in Cambodia, Southeast Asian Water Environment 5, IWA Pub-lishing (2014), pp187-194.
- 4) Kadokami et al. : Survey on 882 Organic Micro-pollutants in Rivers throughout Japan by Automated Identification and Quantification System with a Gas Chromatography Mass spectrometry Database, Journal of Environmental Chemistry, 2009, 19, 3, 351-360.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mizuki Sakai, Yugo Hashimoto, Eiji Matsushita	4. 巻 1
2. 論文標題 Riverbed fluctuation analysis of small rivers equipped with stream barb groins	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Sustainable Construction and Resource Management	6. 最初と最後の頁 885-895
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Akihito SAKAMOTO, Mizuki SAKAI, Azusa MITSUI, Kiwao KADOKAMI
2. 発表標題 Environmental dynamics and source analysis of organic micropollutants in water in Cambodia
3. 学会等名 WET2022online（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Azusa Mitsui, Mizuki Sakai, Kiwako Kadokami
2. 発表標題 Environmental Dynamics of Organic Micropollutants in Waste water and River-water in Cambodia in 2011 and 2018
3. 学会等名 WET2020online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizuki Sakai, Azusa Mitsui, Kiwako Kadokami
2. 発表標題 Survey of the Relationship between Organic Micro-pollutants in River Water and Land Use in Nagano City, Japan
3. 学会等名 WET2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三ツ井梓紗, 酒井美月, 門上希和夫
2. 発表標題 カンボジア王国プノンペン市の水域における半揮発性有機化学物質の経時変化
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三ツ井 梓紗, 酒井 美月, 門上 希和夫
2. 発表標題 網羅分析に基づくプノンペン市近郊の河川水及び下水における化学物質の経時変化
3. 学会等名 日本陸水学会甲信越支部会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井美月
2. 発表標題 水域の環境調査におけるUAV (Unmanned aerial vehicle : 無人航空機) の利用
3. 学会等名 第25回信州魚類研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴博夢、勝山大地、酒井美月
2. 発表標題 河川水中有機汚染物質の多成分一斉分析による調査
3. 学会等名 第44回日本陸水学会甲信越支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mizuki SAKAI, Azusa MITSUI, Kiwako KADOKAMI
2. 発表標題 Survey of the Relationship between Organic Micro-pollutants in River Water and Land Use in Nagano City, Japan
3. 学会等名 WET2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松下 英次 (Matsushita Eiji)  (20369979)	長野工業高等専門学校・環境都市工学科・教授  (53601)	
研究分担者	門上 希和夫 (Kadokami Kiwao)  (60433398)	北九州市立大学・環境技術研究所・客員研究員  (27101)	
研究分担者	井上 隆信 (Takanobu Inoue)  (00184755)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授  (13904)	
研究分担者	松本 嘉孝 (Matsumoto Yoshitaka)  (40413786)	豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・教授  (53901)	
研究分担者	宮里 直樹 (Miyazato Naoki)  (00435413)	群馬工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授  (52301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------