

令和元年6月14日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01788

研究課題名(和文) 都市沿岸域における雨天時越流水に起因する糞便汚染の評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation method of fecal contamination caused by combined sewer overflow in coastal area

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) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：隅田川上流部から台場周辺海域において降雨後経日的に水質調査を実施した結果、合流式下水道雨天時越流水に伴う糞便汚染状況を把握した。微生物指標類の時空間分布は、潮汐に伴う混合希釈、さらには塩分や日射による死滅や分解の影響を受けること、指標細菌と易分解性の医薬品類の間には高い相関があること、細菌類間の相関は非常に高い一方でF-特異と体表面の大腸菌ファージ間の相関は低いことなどが明らかになった。また、類型化された区部における降雨特性と潮位を組み合わせた条件での3次元流動水質シミュレーション結果を活用することで、お台場における大腸菌数のピークを再現できる水浴の適・不適を予報するシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数の地点から雨天時越流水の影響を受ける東京湾沿岸域において広域で経日的な水質調査を実施して、大腸菌や糞便性大腸菌群のような細菌指標だけでなく、糞便マーカーとして大腸菌ファージ、下水マーカーとして医薬品類や合成甘味料なども含めて分析を行い、それらの存在状態や消長、相互関係を整理していることは意義深い。また、大腸菌消長モデルを塩分だけでなく、紫外線による死滅も考慮したものへと改良して、3次元流動水質モデル計算により台場周辺海域における糞便汚染状況を評価する手法を開発した点も高く評価できる。その手法を基礎に、お台場における水浴の適・不適を予報するシステムを構築した点も社会的に意義深いものである。

研究成果の概要(英文)：Water quality surveys were conducted daily after rainfall events in the upstream of the Sumida River and around the coastal area of Daiba. We grasped the day-to-day change in faecal contamination situation caused by the combined sewer overflows, which was affected by the tidal change. The temporospatial changes of microbial faecal indicators are affected by the dilution with saline water, and also by the decay effects due to high salinity and solar radiation conditions. In addition, there is a high correlation among the faecal indicator bacteria and easily degradable pharmaceuticals, while the correlation is relatively low between F-specific and somatic E. coli phages. We developed a forecasting system for bathing at the Odaiba seaside park, which is based on many prediction results of peak number of E. coli in Odaiba coastal area by utilizing the three-dimensional water quality simulation results under conditions combining different types of rainfall in Tokyo and tide changes.

研究分野：都市環境工学

キーワード：環境質定量化・予測 雨天時汚濁 流動水質モデル 合流式下水道 糞便指標微生物モニタリング 下水マーカー 医薬品類 腸管系ウイルス

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 都市水辺空間における健康リスクの評価の必要性

お台場海浜公園のような親水水辺空間で「快適に水遊びができる」をいう目標が掲げられているが、東京区部は合流式下水道で整備されており、雨天時に未処理下水が越流水として沿岸域に流出される。その糞便汚染の実態調査として、大腸菌や糞便性大腸菌群数だけでなく、糞便由来のウイルスや汚水の化学マーカーを多面的に測定することにより、受水域の糞便汚染実態を総合的に評価して、都市水辺空間における健康リスクの基礎情報を提供する必要がある。

### (2) 降雨後の沿岸域における糞便汚染レベルの予測と雨天時下水道の汚濁負荷削減対策

隅田川からお台場周辺海域までを対象とした3次元流動水質モデルを構築済みであることから、様々な降雨や潮汐の条件のもとで大腸菌濃度の時空間分布を再現できるモデルへと改良できれば、越流水由来の汚濁負荷が都市沿岸域の雨天後の糞便汚染に及ぼす影響を定量評価することが可能となり、お台場などの親水空間における糞便汚染のレベル予測、さらには糞便汚染の制御・管理対策の検討を行うことを可能とすることが期待されている。

## 2. 研究の目的

東京湾再生のための行動計画（第二期）に掲げられているように、都市水辺空間で「快適に水遊びができる」という目標のためには、合流式下水道雨天時越流水の問題を解決することが非常に重要である。本研究では、雨天時越流水由来の汚濁負荷が都市沿岸域における雨天後の糞便汚染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に深く関係する糞便汚染の制御・管理に資する科学的な成果を挙げようとするものである。また、雨天時における下水道の効率的運用や雨天時汚濁負荷削減対策について知見を提供できる糞便汚染の評価手法を開発することを目的とする。以下に、具体的な目的を記載する。

- (1) 降雨特性や潮汐の影響を考慮して糞便指標微生物や汚水マーカーの消長を評価すること
- (2) お台場周辺海域の糞便汚染状況を3次元流動水質モデルにより再現すること
- (3) お台場海浜公園における水浴予報システムを構築すること

## 3. 研究の方法

### (1) お台場周辺海域における降雨後の長期・広域曳航調査

お台場を健康リスク影響地点と定め、図1に示すように、隅田川上流部から河口、さらにお台場周辺海域において、降雨後の水質調査を経日的に実施する。大腸菌、糞便性大腸菌群、腸球菌、大腸菌ファージ類、汚水マーカーとしての医薬品類や合成甘味料などを高頻度にて測定する。降雨後採水調査は、2016年10月と11月、2017年10月、2018年6月と7月の降雨に対して実施した。晴天時採水調査は、2018年11月に実施した。図2には、2017年10月に降雨後に経日的に採水した調査期間における降雨、潮位及び採水時刻などを示している。

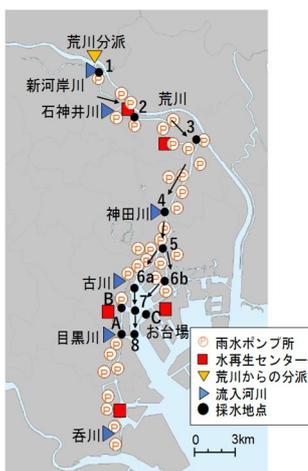


図1 調査対象領域と採水地点

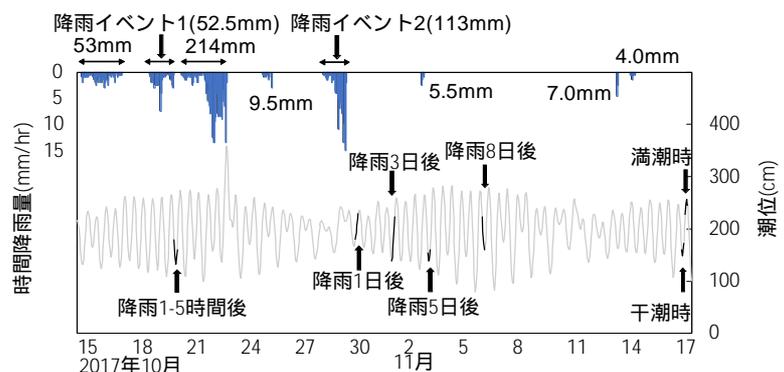


図2 調査期間における降雨量（東京大手町）と潮位

### (2) 沿岸域における糞便汚染指標微生物群の挙動解析

降雨直後と降雨後の経日的な指標微生物群の消長と塩分濃度との関係を調べる。また、4種類の細菌指標（大腸菌、大腸菌群、糞便性大腸菌群、腸球菌）と2種類のウイルス指標（F特異大腸菌ファージ、体表面吸着ファージ）の計6種類の指標微生物間の相関関係を調べ、降雨後の消

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

長に着目した指標微生物の類型化を行う。また、糞便汚染指標の経日的変化の類似性に着目して、調査対象地域の類型化を行う。

### (3) 糞便汚染指標微生物間の相関関係と汚水マーカーの挙動との関係整理

6種類の指標微生物に関する水質調査結果を対象に相関関係を調べる。ただし、分析値は濃度の常用対数値とし、検出限界以下のデータは除く処理をする。また、指標微生物濃度の低下傾向を捉えて、その類似性に着目した指標微生物の類型化を行う。さらに、指標微生物と医薬品類や合成甘味料などの化学マーカーとの相関関係も整理する。

### (4) 雨天時越流水汚濁負荷を考慮した沿岸域における3次元流動水質シミュレーション

区部下水道排水区データを参照して、排水区ごとの雨天時越流量と大腸菌流出負荷量を合理式合成法にて推定して、境界条件を設定した上で隅田川の上流部から台場周辺海域までを解析領域とした水質モデルシミュレーションを実施する。そして、降雨後採水調査結果との整合性からモデルの検定や大腸菌数の時空間分布の再現性を評価する。

## 4. 研究成果

### (1) 隅田川上流部からの流下方向の糞便指標微生物の濃度変化

隅田川最上流からの流下方向における大腸菌と2種類の大腸菌ファージの濃度分布の経日変化を図3に示す。横軸は流下距離であり、縦軸は7地点における指標微生物濃度を示している。大腸菌は、降雨1日後に地点1からの流下とともに濃度が上昇し、地点3から地点5までは同程度であるものの、沿岸域である地点6a, 7, 8では少し上昇傾向にあった。降雨3日後では、地点1, 2において急激な濃度低下があるものの、地点3から地点5にかけて増加した後、沿岸域では緩やかに濃度低下が見られた。その後、降雨5日後、8日後と経過日数とともに大腸菌濃度は低下を続けている。流下距離が25km付近の沿岸域では降雨8日後には検出限界以下となる地点もあった。

F特異大腸菌ファージも大腸菌と同様に、降雨1日後と3日後において地点1から地点3にかけて大きく濃度が増加している。また、海水の影響を受けやすい流下距離25km付近の可能域においても濃度は低下しておらず、塩分耐性が大腸菌より高いものと推察された。体表面吸着ファージについては、流下距離が20kmまでの地点では降雨後の濃度変化は小さく、流下距離が20km以降の地点では、降雨後5日後から8日後にかけて濃度低下は顕著であった。このように、全ての指標微生物において、降雨8日後の沿岸域での濃度の低下は顕著であった。これは海水との混合による希釈や高い塩分濃度に伴う死滅による濃度低下である可能性が推察される。

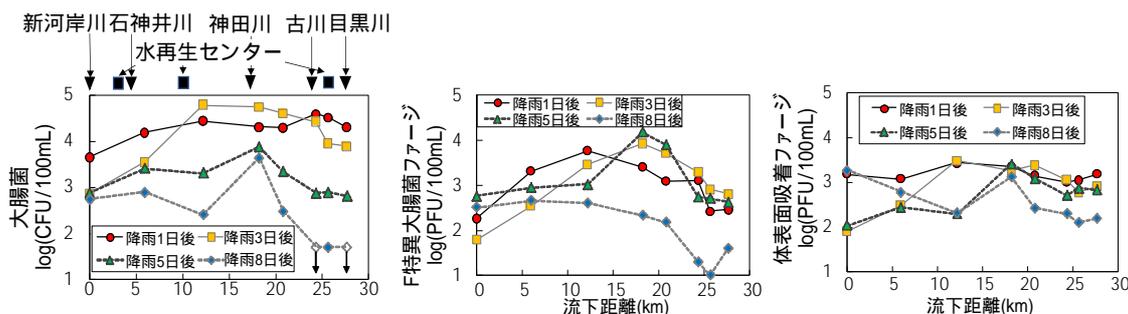


図3 隅田川の流下距離と指標微生物濃度の関係

### (2) ウイルス感染力価指標としてのF特異RNA大腸菌ファージG の評価

大腸菌に代わるCS0によるウイルス汚染の指標として、F特異RNA大腸菌ファージG (G - FRNAPH) の感染力を考慮した検出を行い、指標微生物として利用されている大腸菌およびF特異大腸菌ファージ(FPH)を測定し、それらの挙動を比較した。降雨後の沿岸水試料の多くに大腸菌やFPHは検出された一方、G -FRNAPHは一部の地点で不検出となった。これは、G -FRNAPHは環境中で不活化しやすく、下水処理で減衰しており処理水にもほとんど含まれていないためと考えられた。

また、大腸菌やFPHと比較して、G -FRNAPHは、雨天時/晴天時 濃度比の平均値が大きい傾向が見られた(P=0.07)。このことから、GIII -FRNAPHは他の指標と比べて、降雨後に検出されたもののうち、処理水など平常時の影響は小さく、CS0に由来するものの割合が高いと推測できた。

### (3) 糞便汚染指標微生物と汚水の化学マーカーとの相関関係

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

2016年11月降雨後の1日目の水質データを例として、糞便汚染指標微生物と汚水の化学マーカーとの間の相関関係を調べた結果を表1にまとめた。指標微生物や化学マーカーなどの測定項目は、大きく4つのグループに分けることができる。それらは、1)大腸菌(*E. coli*)、大腸菌群(TC)；2)F特異大腸菌ファージ(FPH)と体表面大腸菌ファージ(SOMPCH)；3) 易分解性の医薬品類 (acetaminophen (ACE), theophylline (THEO), and caffeine (CAF))；4) 難分解性の医薬品類 (carbamazepine (CMZ) and crotamiton (CTMT))である。他の調査結果を含めて測定濃度は対数正規分布を示したことから、対数変換した濃度で相関分析を実施した。非常に高い相関と見なした相関係数0.9以上を緑色でハイライトしている。糞便指標細菌類、易分解性の医薬品類、難分解性の医薬品類の各グループ内では、高い相関がみられた。しかしながら、二つの大腸菌ファージ間の相関は高くない結果であった。

また、難分解性の医薬品類は、他の指標やマーカーとの相関性は低く、易分解性の医薬品類はFPHと相関性が高いものの、他の糞便指標細菌やSOMPCHとは相関が低目であった。したがって、これらの相関関係から、5つの指標及び化学マーカー、すなわち大腸菌、FPH、SOMPCH、CAF、およびCMZを選択することで、雨天時越流水に伴う糞便汚染状況を多面的に評価可能であることが示唆された。

表1 微生物指標と医薬品類の相関関係 (2016年11月降雨1日後)

	Correlation coefficient (R)							
	<i>E. coli</i>	TC	FPH	SOMPCH	ACE	THEO	CAF	CMZ
TC	0.95							
FPH	0.59	0.65						
SOMPCH	0.87	0.89	0.36					
ACE	0.73	0.81	0.96	0.59				
THEO	0.35	0.51	0.92	0.23	0.87			
CAF	0.44	0.53	0.97	0.27	0.92	0.96		
CMZ	0.86	0.96	0.61	0.93	0.79	0.53	0.51	
CTMT	0.84	0.95	0.63	0.90	0.81	0.56	0.54	1.00

#### (4) 合成甘味料の汚水マーカーとしての有用性

雨天時越流を受けた沿岸水域における、合成甘味料のサッカリンとアセスルファムについて汚水負荷のマーカーとしての有用性を確認できた。サッカリンが未処理下水、すなわち雨天時越流水のマーカーとなり、アセスルファムが1次処理と2次処理を加えた下水全般のマーカーとなることを明らかにした。東京で25mm程度の雨が降った翌日の隅田川河口の水におけるCS0の寄与率(体積比)は1%程度であり、二次処理水の寄与は10%程度であると推定され、降雨後2日目には平水時濃度レベルに戻ることが示された。流入河川流量や潮の干満により空間的に大きく位置を変えるCS0由来の汚染水塊を示す指標として有用であると判断された。

#### (5) 大腸菌消長モデルへの紫外線の影響の組み込み

大腸菌濃度の計算は、以下に示す移流拡散方程式をもとに行っている。不活化係数は基本不活化係数  $k_b$  と塩分濃度による不活化係数  $k_s$  に、さらに太陽光(紫外線)による不活化も考慮するため、新たに  $k_l$  を設定した。文献値<sup>(1)-(3)</sup>を参照して、 $k_b=1.62(\text{day}^{-1})$ 、 $k_s=0.032(\text{day}^{-1}\text{ppt}^{-1})$ 、 $k_l=0.069(\text{day}^{-1}\text{m}^2/\text{W})$ とした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z} + SC) - kC$$

$C$ : 濃度( $M/L^3$ ),  $t$ : 時間( $T$ ),

$u, v, w$ :  $x, y, z$ 方向の流速( $L/T$ ),

$K_x, K_y, K_z$ :  $x, y, z$ 方向の乱流拡散係数( $L^2/T$ ),

$S$ : 沈降速度( $L/T$ ),  $k$ : 不活化係数( $L^2/T$ )

$$k = k_b + k_s C_s + k_l I \exp(-ah)$$

$k_b$ : 基本不活化係数( $/s$ )

$k_s$ : 塩分濃度による不活化係数( $/s \cdot ppt$ )

$C_s$ : 塩分濃度( $ppt$ )

$k_l$ : 太陽光による不活化係数( $\text{m}^2/\text{s} \cdot \text{W}$ )

$I$ : 太陽放射照度( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$a$ : 消散係数 =  $0.1(/m)$ ,  $h$ : 水深( $m$ )

#### (6) 3次元流動水質モデルによる降雨後の沿岸域水質の再現計算

2016年10月の降雨について、合理式合成法に基づいて各排水区から排出された越流量と大腸菌負荷量を推定した後、大腸菌の太陽光による不活化影響を考慮しない場合と考慮した場合での大腸菌濃度の分布を図4に示す。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

降雨終了直後（10月17日16時時点）では、古川、目黒川、神田川河口や周辺のポンプ所から大腸菌が流入していることが見て取れる。18時間後の18日10時時点では、流入した高濃度汚濁水塊が混ざり合い、お台場海浜公園も大腸菌濃度が上昇している。このときの太陽光による不活化の影響の明らかな違いは分からない。しかし、4日後の22日になると、太陽光による不活化の影響を考慮した方が、大腸菌濃度が低くなっており、値でいうと1桁ほど小さい。太陽光による不活化の影響を考慮しない場合、お台場表層における大腸菌濃度は $1.5 \times 10^3$  (CFU/100mL)、考慮した場合には $1.2 \times 10^2$  (CFU/100mL)と、考慮した場合の方が実測値 $1.4 \times 10^2$  (CFU/100mL)に近くなった。

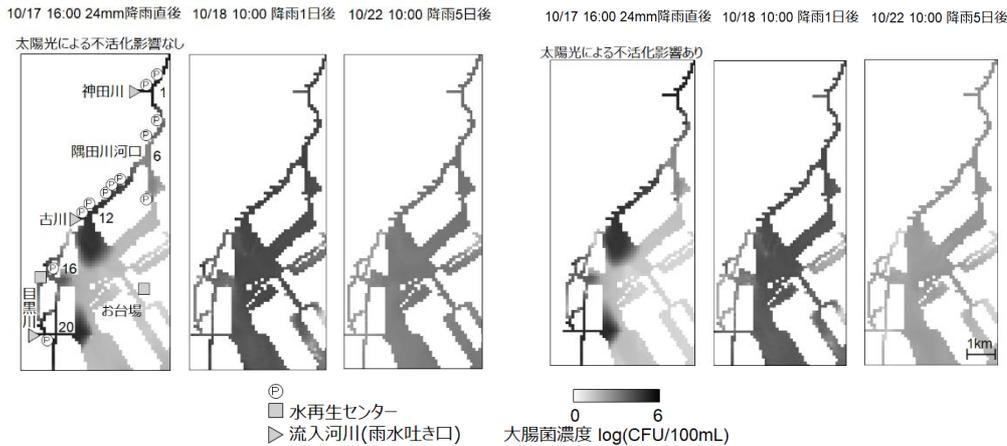


図4 太陽光による不活化の有無による大腸菌濃度分布の違い

#### (7)お台場における海水浴予報システムの構築

過去10年間の東京都23区内13地点の降雨量分布をクラスター解析により8グループに類型化し、類型化した降雨量分布と潮位変動を多数組み合わせさせた条件で3次元流動水質解析モデルの計算を実施した。そして、お台場における大腸菌数を予測したデータベースを構築した。その結果を基に、対象降雨を類型化することでお台場の大腸菌数を予測して水浴場の水質判定基準値への適・不適を予報するシステムの構築を試みた。図5には、大腸菌のモデル計算結果と予報システムでの結果を併せて示しているが、類型化降雨と水質予測データベースを組み合わせることで、大腸菌濃度を適切に再現できることが示された。



図5 2017年夏における水質予測のデータベースを使った予報値

#### < 引用文献 >

- 1) Omura, T., Onuma, M. & Hashimoto, Y. : VIABILITY AND ADAPTABILITY OF ESCHERICHIA-COLI AND ENTEROCOCCUS GROUP TO SALT-WATER WITH HIGH-CONCENTRATION OF SODIUM-CHLORIDE, Water Science and Technol., Vol.14, 115-126 (1982)
- 2) 河端俊治 & 原田常雄：殺菌灯による水の消毒、照明学会誌 36, 89-96 (1952)  
大瀧雅寛：紫外線照射による水中病原微生物の不活化、お茶の水女子大学生活工学研究 1, (1999)

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Po pipattana Chomphunut, Nakajima Masaki, Kasuga Ikuro, Kurisu Futoshi, Katayama Hiroyuki, Furumai Hiroaki : Spatial Distribution and Temporal Change of PPCPs and Microbial Fecal Indicators as Sewage Markers after Rainfall Events in the Coastal

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

Area of Tokyo, Journal of Water and Environment Technology, Vol.16, 2018, p149-160

<https://doi.org/10.2965/jwet.17-052>

鈴木 元彬, Chomphunut POOPIATTANA, 春日 郁朗, 古米 弘明: 隅田川上流部から台場周辺海域における降雨後の糞便汚染状況と指標微生物の相互関係、土木学会論文集G(環境) / 74 巻、7 号、2018、p111\_169-111\_179

[https://doi.org/10.2208/jscejer.74.111\\_169](https://doi.org/10.2208/jscejer.74.111_169)

賀須井 直規, 春日 郁朗, 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担削減量の評価、土木学会論文集G(環境) / 72巻、7 号、2016、p111\_153-111\_160

[https://doi.org/10.2208/jscejer.72.111\\_153](https://doi.org/10.2208/jscejer.72.111_153)

〔学会発表〕(計5件)

関瑛理子, 古米弘明, 片山浩之: 雨天時越流水発生後の都市水域における糞便指標細菌とウイルス類の消長の実測、第53回日本水環境学会年会、2019年

五味菜尋, 古米弘明, 高田秀重: フェノール系PPCPsの直接誘導体化による分析法の開発、第53回日本水環境学会年会、2019年

Poopipattana Chomphunut, Nakajima Misaki, Suzuki Motoaki, Kasuga Ikuro, Furumai Hiroaki: Effects of rainfall characteristics and tidal changes on behavior of CSO-derived sewage markers in Odaiba coastal area, Tokyo, Water and Environment Technology Conference, Matsuyama, 2018年

北山 千鶴, 李 星愛, 萩野 裕基, 森田 健二, 古米 弘明: お台場海浜公園における海水浴予報システムの試行運用、土木学会 第55回環境工学研究フォーラム、2018年

Daniel Ekhlash, Kurisu Futoshi, Kasuga Ikuro, Furumai Hiroaki: Microbial community changes associated with combined sewer overflow in an urban river in Tokyo, Water and Environment Technology Conference 2017, 2017年

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 片山 浩之

ローマ字氏名: (KATAYAMA, Hiroyuki)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院工学系研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 00302779

### (2) 研究分担者

研究分担者氏名: 春日 郁朗

ローマ字氏名: (KASUGA, Ikuro)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院工学系研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 20431794

### (3) 研究分担者

研究分担者氏名: 栗栖 太

ローマ字氏名: (KURISU, Futoshi)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院工学系研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 30312979

### (4) 研究分担者

研究分担者氏名: 高田 秀重

ローマ字氏名: (TAKADA, Hideshige)

所属研究機関名: 東京農工大学

部局名: 農学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70187970

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。