

令和元年5月27日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00621

研究課題名(和文)ノリ養殖を考慮した下水道システムの弾力的運用がもたらす環境影響に関する研究

研究課題名(英文) Environmental Impact Study on Flexible Management of Sewage Treatment System for Seaweed Growth

研究代表者

山西 博幸 (YAMANISHI, Hiroyuki)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：20240062

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ノリ養殖場への栄養塩供給策として実施されている下水処理の硝化抑制運転による放流水がノリ漁場および周辺水域に及ぼす影響について、現地調査および室内実験を通して検討した。その結果、硝化抑制された放流水は、ノリの生育に必要な基準値を満たす濃度レベルでノリ漁場水域に到達していることを確認した。また、放流水由来と思われる高濃度のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N水塊が河川遡上域に流入し、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の河道内底泥への蓄積・移行を示唆した。さらに、ノリのバイオアッセイ実験から下水処理水と海水の最適な混合塩分環境として20‰の目安が提案された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地域ニーズに対し、既存施設として日々稼働する下水処理施設の有効活用として全国的にも注目されている事例に対し、十分な科学的根拠のないまま実水域で実施されることへの懸念を端緒として行われるものである。とかく、短期的な漁獲収量に目を奪われやすい状況にある実態から、本研究を通じた科学的な事実と現状を示すことに大きな意義がある。学術的には、現地調査を通じて、有明海湾奥部の特異な流れ場で、かつノリ養殖業を中心とした水産業が発達した河口沿岸水域に対して地域の特性に応じた水質管理の有効性と将来的な流域管理に向けた下水道の果たすべき役割への提案につなげることができる。

研究成果の概要(英文)：Field observation and laboratory experiment were conducted to study the influence of nitrification restrained water in the seaweed cultivation area and the receiving water area. Especially, the transport of ammonium nitrogen before and after nitrification restraint was investigated. As a result, the treated sewage water flowed out to near the seaweed cultivation area and the nutrient concentration was enough for the seaweed growth. On the other hand, the effluent water body was transported near the upper limit of the tidal area from the river mouth. In addition, the accumulation of deposits including ammonium nitrogen settling out of a tidal river was indicated. Also, the salinity at 20‰ as mixing treated sewage water with seawater was proposed to keep the seaweed production thorough a micro-well plate bioassay.

研究分野：環境生態工学

キーワード：季別運転 硝化抑制 アンモニア態窒素 ノリ養殖 下水処理場 河川感潮域 有明海

## 1. 研究開始当初の背景

有明海湾奥部水域には日本を代表するノリ養殖場が形成され、その育成を左右する水域の栄養塩が毎年のように注視されている。このような中、下水処理水を放流している佐賀市下水浄化センターでは、ノリ生産者との協議のもとで、2007年から冬期（ノリ養殖期）の硝化抑制と夏期（ノリ休漁期）の硝化促進の試みを進め、現在までノリ生産性の向上に寄与していると言われている。一方、硝化抑制された放流水の受水域への定量的な環境評価は、ほとんどなされていない。陸域負荷としての窒素量こそ、大きく変化していないものと思われるが、硝化反応が不十分なまま放出される高い濃度のアンモニア態窒素がノリの生長以外に影響があるのかないのかわからない現状を放置することは看過できない状態にある。

## 2. 研究の目的

本研究は地域特性といえる有明海湾奥部特有の大きな干満差のある水域に栄養塩濃度を調整した処理水の挙動把握とともにノリ養殖への効果の有無を科学的根拠をもって示すとともに、放流水による水・干潟環境および河口沿岸域の生態系に及ぼす影響について明らかにするものである。

## 3. 研究の方法

硝化抑制された下水処理水が放流された受水域に及ぼす影響を現地調査および室内実験により明らかにする。対象物質は放流水中に含まれる窒素成分であるアンモニア態窒素とし、これが放流先の強混合型感潮河川内をどのように流動・拡散し、河口域まで移動する過程での質変換も含めた輸送特性および硝化抑制後の放流水の安全性からのバイオアッセイ調査も検討する。また、有明海湾奥河口部の泥干潟に懸濁態として沈降移行した堆積物を採取分析し、堆積物内の質変換や自浄能への影響を明らかにする。さらに、一連の調査・解析に基づき、放流水の質的变化が有明海湾奥部の物質循環や干潟生態系に及ぼす影響について考察する。

## 4. 研究成果

(1) 下水処理の季別運転がもたらす水域への影響－佐賀市下水浄化センターを基点とした水環境への影響－

①放流水の長期モニタリング 図1は、下水処理放流水の定期採水の分析結果で、放流水中のCOD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN 及びTP 濃度の経月変化を示している。下水処理場での硝化抑制運転は、10月以降に開始され、その効果が明瞭に発現するのは例年12～3月頃である。また、硝化抑制運転時における栄養塩供給としては窒素成分の寄与が大きく、TN濃度中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は9割以上となっており、12～3月期で30mg/Lを超える。これは、2007年から試行している佐賀市下水浄化センターの季別運転による放流水質の変動の基本的な特性と言える。

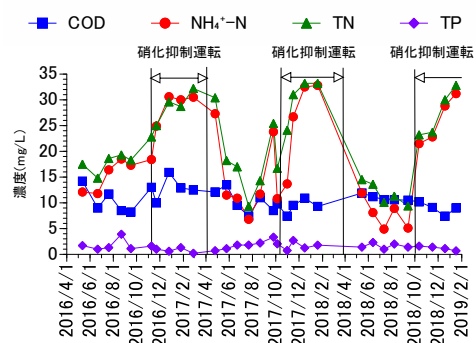


図1 放流水中のCOD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, TP濃度の経月変化

②放流水流下に伴う水域への影響 調査A(硝化抑制運転前調査:2017年8月21日(大潮, 8:30-15:00))では、無動力の備船を放流口付近から流下させ、所定の地点で表層水を採取した。その結果、放流水と河川水の合流地点から約6時間かけて流下し、放流水塊のノリ漁場域(5～13 km)への到達を確認した。また、放流水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度を基準とした各地点における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の割合は、放流水が河川水と混合流下間もない地点で20%、ノリ漁場内では1～3%であった。この間、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の上昇が見られなかったことや海水による硝化反応阻害も踏まえれば、

$\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃度の減少は希釈・拡散によるものが主であったと言える。なお、ノリ漁場内の DIN 成分比は  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  が 6 割,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  が 4 割ほどであった。

図 2 は、調査 B (硝化抑制運転後調査: 2017 年 12 月 16 日 (大潮, (a) 8:00~9:30, (b) 10:00~11:30)) での  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  の空間分布である。図より、放流水と河川本川との合流部付近に高濃度の  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃度水塊の存在が確認され、下げ潮とともに放流水起源と思われる  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃度の流下方向への拡がりが見られ、満潮から約 2 時間で放流水の影響が流下約 5 km 付近のノリ漁場内に到達し、その  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃度は 0.1 mg/L まで上昇していた。ノリの生育に必要な DIN 濃度の基準は 0.07~0.1 mg/L とされており、本調査の結果は  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  のみでこれを満足していた。

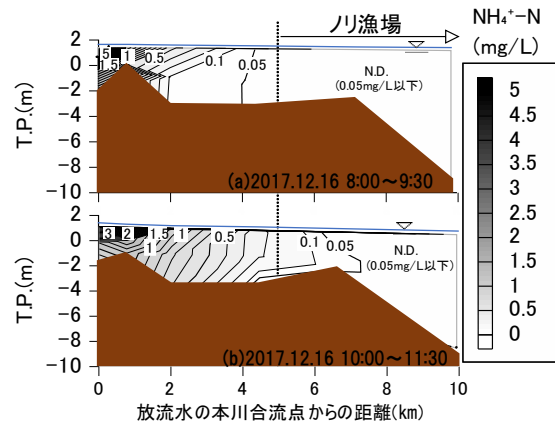


図 2 放流水の本川との合流点を起点とした流下方向の  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  の空間分布

放流水受水域の底質に関する観点では、現地底泥を用いた室内実験から、温度上昇や巻き上げに伴う栄養塩の再帰帰量の増加を示した。また、受水域での水理・水質調査も含め、下水処理場を含む陸域負荷、底面からの巻き上げ、沈降および各断面を通過する栄養塩輸送量を概算した。その結果、放流水受水域におけるアンモニア態窒素を主体とした窒素量収支から、冬期のノリ吸収量を補充する形で硝化抑制水の供給がなされていることや放流水の影響が及ぶ水域とノリ漁場への拡がりを科学的に示した。

③放流水流下に伴う栄養塩の拡がりに関する一考察 これまでの現地観測から、放流水に含まれる  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  は主として希釈拡散によって流下し、下げ潮の流下過程における硝化反応は半周期程度では無視でき、その影響は表層水付近となる。これらを踏まえ、陸域負荷による影響を把握するための簡単な平面 2 次元の数値計算を行った。基礎式には、連続の式、コリオリ力を加味した運動方程式を用い、モノー式に基づく菌体反応およびアンモニア酸化を加味した移流拡散方程式を適用した。境界条件としては、六角川、嘉瀬川および本庄江川の流量と  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃度を与え、満潮から干潮を想定した 6 時間後の  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  の濃度分布 ( $1\text{mol}/\text{m}^3 \approx 14\text{mg}/\text{L}$ ) を求めた (図 3)。図 4 は 2017 年 1 月に佐賀県が実施した有明海湾奥部のノリ色落ちの調査結果を示したもので、これは数値計算による放流水の流下影響範囲 (図 4) とおおよそ一致した。

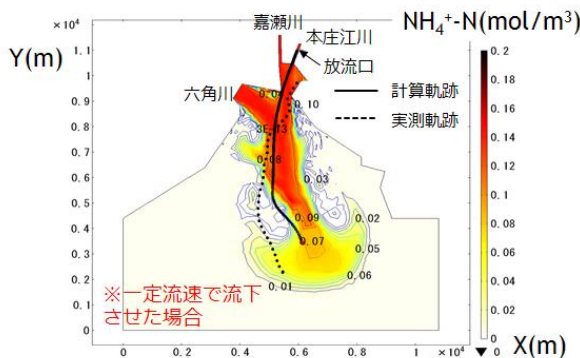


図 3 粒子軌跡と  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃度 (満潮から 6 時間後)

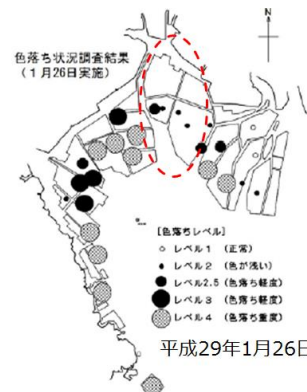


図 4 ノリの色落ちの推移

(2) 下水処理の季節別運転がもたらす水域への影響—大牟田市北部浄化センターを基点とした水環境への影響—

①受水域内での  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  の動態結果 2017 年 12 月 15 日の下げ潮時に観測した各地点の  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  濃

度及び塩分を図5に示す。地点1が最上流で地点9が最下流である。地点10～地点12は海域で、順番に河口から遠ざかる。浄化センター放流水（以下、放流水）は、地点6付近で河川に放流される。放流水が流入する付近の河川水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度が高く、下流では海域に近づくにつれ濃度が低下した。塩分上昇がみられることから、海水で希釈されたと考えられる。堂面川河口沖で2017年12月20日

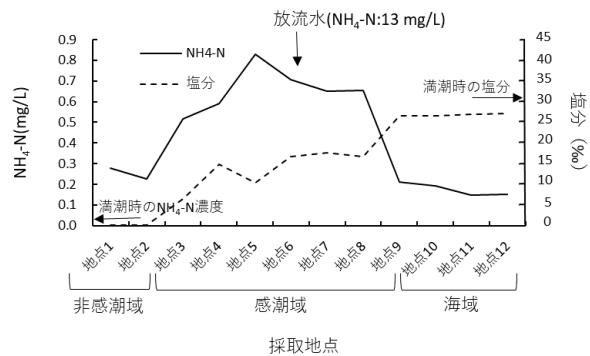


図5 堂面川及び河口付近海域の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度及び塩分

満潮時に採取した海水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度を測定したところ、0.04 mg/Lであった。地点10～地点12 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度：0.15～0.19 mg/L)と比較して低い値であったことから、放流水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、河口付近の海域まで到達していると考えられる。

②DIN負荷量 2017年5月～2018年4月まで毎月1回、図5における地点1及び放流水を採取した。また、同時に流速等も測定した。採取した試料のDIN濃度を求め、流速等から算出した流量を乗じ、DIN負荷量を求めた。

硝化促進期（2017年5月～10月）のDIN負荷量の平均値は2.0 t/月で、硝化抑制期（2017年11月～2018年4月）の平均値は5.2 t/月であった。このことから、DINは硝化促進期と比較して硝化抑制期は3.2 t/月多く有明海に供給されていると算出された。これは、ノリに含まれる窒素量等から算出すると、ノリ養殖場1.5 $\text{km}^2$ に相当することが明らかとなった。

### (3) 下水処理水によるノリの生長促進効果

ここでは、ノリの初期発生段階である殻胞子と幼葉状体の生長過程において、塩分低下による生育影響、人工海水と下水処理水の混合溶液中での生育応答、栄養培地による栄養要求濃度、実際に下水処理水が放流されているノリ養殖場の現場海水について、マイクロウェルプレートを用いた生物応答試験から定量的に検討した。実験結果より、ノリ殻胞子の生長に対する塩分低下の無影響塩分濃度は20‰であり、塩分濃度10‰と15‰においても殻胞子は生育でき、ノリ幼体は塩分10‰が下限値であった。また、ノリの栄養要量は、下水処理放流水の栄養塩量よりも高いことがわかった。

図6に、ノリ殻胞子の生長に及ぼす人工海水と各下水添加率の混合溶液の影響を示す。下水添加率33, 50, および67%で培養した場合、ノリの生長指標である蛍光強度は、対照区である下水添加率0%の場合の蛍光強度と比較して、有意に高くなった。また、顕微鏡による観察の結果、下水添加率33%におけるノリ殻胞子の生長が最も良好であることが確認された。さらに、試験区は下水処理水由来の栄養塩濃度が高いために、殻胞子は発芽して幼体となり、生長が促進されて蛍光強度は増加したと考えられる。全体を通

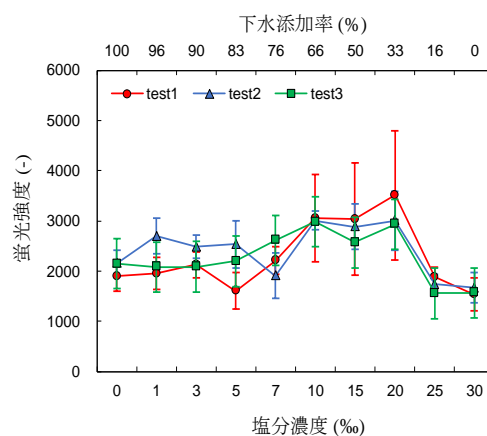


図6 異なる下水処理水添加率における蛍光強度（ノリの生長指標）の変化

した比較試験結果から、海水の塩分が10‰以上となる条件で淡水である下水処理水と混合すれば、栄養塩が強化されてノリ殻胞子の生長促進効果が得られる。一方で、塩分7‰となると、栄養塩濃度が高くて低塩分による著しい生長阻害が生じる。栄養塩を含む下水処理水の海水へ

の添加は、栄養塩濃度の増加と塩分低下とのトレードオフの関係にある。ノリの栄養量は、下水処理放流水の栄養塩量よりも高い。したがって、下水処理水と海水の適切な混合比は、塩分を指標として 20‰以上に保持することが重要である。

#### (4) まとめ

①放流水は河川との混合のもと、主として希釈・拡散作用を受けて輸送され、硝化抑制運転後は、ノリの生育に必要な  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度をノリ漁場内に供給していたことを調査および数値計算で確認した。②感潮域での  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の挙動特性として、河道内では SS との吸着促進による蓄積・移行、下流域では SS の吸着除去を受けず、さらに海域に向かって輸送される可能性を示唆した。③底泥の溶出実験から硝化抑制運転後の水温上昇に伴い、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の供給増の可能性を示唆した。④大牟田市沖での調査から、浄化センターの処理工程において硝化抑制することによって DIN 負荷量は 3.2t/月増加した。これは、ノリ養殖場 1.5km<sup>2</sup> で必要とする N 量に相当する。⑤下水処理水と海水が混合する塩分環境は 20‰を目安としてノリ養殖場を管理することによって、最も効果的に下水処理水中の栄養塩を有効利用できる。

#### 5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(計 4 件)①山西博幸, 青木優佳: 河川感潮域内におけるアンモニア態窒素輸送に関する一考察, 水環境学会誌, 査読あり, Vol. 42, No. 3, 117-122, 2019. ②Suzuki, Y., Nakada, K., Nukazawa, K., Yamanishi, H.: Optimum Condition for Valuable Seaweed Growth to Utilize Treated Sewage as a Nutrient Source. Journal of Environmental Science and Technology, 査読あり, 12(1), 17-25, 2019. ③鈴木祥広, 西山正晃, 糠澤桂, 石井聡: 下水処理水が流入する小河川における大腸菌の調査. 水環境学会誌, 査読あり, 41(2), 19-26, 2018. ④山西博幸, 前田優斗, 田中溪介, 大石京子: 河川感潮水域における硝化抑制処理水の輸送とその環境影響に関する調査研究, 水環境学会誌, 査読あり, Vol. 41, No. 2, pp. 35-42, 2018.

【学会発表】(計 31 件)①Anika Sarah et al, Study on Nutrient Transport in Discharged Water and Sediment Quality in Receiving Area by Seasonal Operation of Sewage Treatment Plant, The 53rd Annual Conference of Japan Society on Water Environment 2019, 2019. ②秦弘一郎ら, 季別運転を行う下水処理場の放流水における窒素成分の動態調査, 第 53 回 日本水環境学会年会, 2019. ③古賀匠ら, 放流水受水域における栄養塩輸送に関する研究, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019. ④松尾広希ら, 下水処理の季別運転が水域内底質環境に及ぼす影響, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019. ⑤柏原学ら, 季別運転を行う下水処理場の放流水及び河川水に含まれる栄養塩類の動態調査, 第 45 回環境保全・公害防止研究発表会, 2019. ⑥柏原学ら, 季別運転を行う下水処理場の放流水に含まれる栄養塩類の動態と放流先海域における栄養塩類及び COD への影響, 平成 30 年度瀬戸内海の環境保全・創造に係る研究ワークショップ, 2018. ⑦鈴木祥広, 海藻を用いたバイオアッセイによる環境影響評価 (基調講演), 第 5 回ワークショップ「海洋環境影響を評価するアッセイ法に関する最新の話題」, 2018. ⑧鈴木祥広, 海藻を用いた環境影響評価 (招待講演), 日本海学会西日本支部秋季講演会, 2018. ⑨山西博幸ら, 下水処理の季別運転が流下沿岸水域に及ぼす影響に関する研究, 第 21 回日本水環境学会シンポジウム, 2018. ⑩山西博幸ら, 河川感潮域における下水処理放流水の挙動と栄養塩輸送に関する研究 -季別運転による影響調査-, 第 21 回日本水環境学会シンポジウム, 2018. ⑪秦弘一郎ら, 季別運転を行う下水処理場からの放流水に含まれる栄養塩類の動態調査, 第 42 回瀬戸内海水環境研会議, 2018. ⑫A. Sarah and H. Yamanishi, Field Survey on Nutrient Transport in Discharged Water Receiving Area by Seasonal Operation of Sewage Treatment Plant, WET2018, 2018. ⑬山西博幸: 有明海湾奥部水域における諸問題と取り組み事例 -地域特性に応じた放流水の質的基準作りのためのモニタリング- (特別講演), 第 52 回日本水環境学会年会併設研究集会, 2018. ⑭山西博幸ら, 下水処理放流水の流下に伴う栄養塩濃度の現地



観測, 第 52 回日本水環境学会年会, 2018. ⑮秦弘一郎ら, 季別運転を行う下水処理場からの放流水中に含まれる栄養塩類の動態調査, 第 52 回日本水環境学会年会, 2018. ⑯上田卓矢ら, 下水と河川水における大腸菌の phylogroup 分類の比較, 第 52 回日本水環境学会年会, 2018. ⑰大島一輝ら, 下水処理放流水の流下に伴う栄養塩の拡がりに関する現地調査, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018. ⑱青木優佳ら, 河道断面内における SS およびアンモニア態窒素の輸送に関する現地調査, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018. ⑲谷村聡政ら, アンモニア態窒素濃度の高い底泥が直上水に及ぼす影響, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018. ⑳大島一輝ら, 季節別運転を行う下水処理放流水受水域での水質調査, 平成 29 年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会, 2018. ㉑橋本怜奈, 鈴木祥広, 下水処理水の流入する都市小河川における大腸菌の動態に関する調査研究, 平成 29 年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会, 2018. ㉒柏原学ら, アンモニア態窒素を含み塩素消毒された下水処理場放流水の全窒素濃度分析法の検討, 平成 29 年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会, 2018. ㉓中田光紀ら, 下水処理水による海藻ササビノリの生長促進効果に関する基礎的研究, 第 54 回環境工学研究フォーラム, 2017. ㉔山西博幸ら, 下水処理放流水の流下に伴う水・底質環境への影響調査, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017. ㉕木山剣生ら, 下水処理場の季節運転が底質環境に及ぼす影響に関する現地調査, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017. ㉖田中溪介ら, 河川感潮域における下水処理放流水の挙動に関する研究, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017. ㉗前田優斗ら, 季節別運転による下水処理放流水の流下に伴う受水域への影響, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017. ㉘木山剣生ら, 下水処理場の季節運転が水域内の底質環境に及ぼす影響調査, 第 51 回日本水環境学会年会, 2017. ㉙田中溪介ら, 河川感潮区間でのアンモニア輸送に対する塩分及び SS の影響, 第 51 回日本水環境学会年会, 2017. ㉚前田優斗ら, 硝化抑制された下水処理水の受水域内での挙動とその影響調査, 第 51 回日本水環境学会年会, 2017. ㉛西山正晃ら, 下水処理水が流入する小河川で再増殖する大腸菌の遺伝子解析, 第 51 回日本水環境学会年会, 2017.

【図書】(計 0 件) 【産業財産権】(計 0 件) 【その他】なし

## 6. 研究組織 (1) 研究分担者

○研究分担者氏名: 大石 京子

ローマ字氏名: (OISHI, Kyoko)

所属研究機関名: 佐賀大学

部局名: 理工学部

職名: 客員研究員

研究者番号: 20110835

○研究分担者氏名: 鈴木 祥広

ローマ字氏名: (SUZUKI, Yoshihiro)

所属研究機関名: 宮崎大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号: 90264366

○研究分担者氏名: 石橋 融子

ローマ字氏名: (ISHIBASHI, Yuko)

所属研究機関名: 福岡県保健環境研究所

部局名: 環境科学部水質課

職名: 水質課長

研究者番号: 90463512