

令和 2 年 9 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01893

研究課題名（和文）バイオフィーム内のN<sub>2</sub>O生成・消費機構の解明と排出削減が可能な排水処理技術の開発研究課題名（英文）Elucidation of N<sub>2</sub>O production/consumption mechanisms in biofilms and development of a wastewater treatment technology mitigating N<sub>2</sub>O emission

研究代表者

寺田 昭彦（Terada, Akihiko）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30434327

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、中空状ガス透過膜の内側より曝気槽の排気ガスを供給し、外側のバイオフィームに消費させることにより排気ガス中に含まれる温室効果ガスの亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）を削減する新しいバイオフィームプロセスの開発に資するものである。研究成果として、ガス透過膜上に形成されるバイオフィームが、N<sub>2</sub>Oを消費する細菌の活性を活かし、N<sub>2</sub>Oの大幅な削減を達成できることを明らかにした。また、N<sub>2</sub>Oの排出削減に寄与する有用な種類を選定した。さらに、N<sub>2</sub>O消費を高活性に行う細菌の温度や酸素に対する耐性評価を行い、N<sub>2</sub>O削減が十分に行える条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）は第三の温室効果ガスと言われ、排水の高度処理を行っている施設での排出削減が求められている。N<sub>2</sub>Oは高度処理施設において、排水中に含まれる窒素化合物を窒素ガスに変換する際に副生成物として排出される。本研究は、このN<sub>2</sub>Oを効率的に削減できる新しい技術を提案している。本研究で得られた成果は、提案した技術の排水処理施設への導入によるN<sub>2</sub>O排出量削減につながられる。また、N<sub>2</sub>Oを効率的に窒素ガスに分解できる細菌群を同定したため、農地などへの適用により、N<sub>2</sub>O排出の削減が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed at developing a novel biofilm process mitigating the emissions of highly potent greenhouse gas, nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). The process is based on a biofilm on a gas-permeable membrane where the exhaust gas from an aeration tank, containing N<sub>2</sub>O, is supplied. The reactor operation demonstrated that the biofilm process substantially alleviates N<sub>2</sub>O emission by bacteria consuming N<sub>2</sub>O in the biofilm. The microbial community analysis successfully identified promising N<sub>2</sub>O-consuming bacteria. Furthermore, physiological experiments revealed favorable ranges of temperature and oxygen levels for the selected bacteria to maximize their N<sub>2</sub>O consumption potentials.

研究分野：環境バイオテクノロジー

キーワード：亜酸化窒素 亜酸化窒素還元細菌 ガス透過膜 バイオフィーム 15Nトレーサー法 微生物叢解析 硝化脱窒

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

排水中の窒素化合物は、前段の酸化反応である硝化と後段の還元反応である脱窒の二段階の反応を経て窒素ガスに無害化される。硝化・脱窒を促進させるために循環式硝化脱窒法などの高度処理が導入され、生物学的窒素除去プロセスの強化が行われている。一方、近年の大きな課題は、温室効果ガスとして知られる亜酸化窒素( $N_2O$ )の排出量増大である。 $N_2O$ は $CO_2$ の265倍の温室効果を持つ強力な温室効果ガスである(IPCC, 2014, *the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*)とともに、オゾン層破壊物質としても知られている(Ravishankara *et al.*, 2009, *Science* 326: 123-125)。したがって、耕作地などの土壌環境に加えて排水処理施設からの $N_2O$ 排出削減が強く求められている。さらに、排水中に存在する窒素化合物除去の省エネルギー化を目指した運転を行うと、より多くの $N_2O$ が排出されるため、排水処理の省エネルギー化と $N_2O$ 排出由来の温室効果ガス削減がトレードオフの関係になってしまう。窒素除去の省エネルギー化と $N_2O$ 排出削減を両立できる技術の確立が望ましい。

$N_2O$ は硝化反応の副生成物および脱窒反応の中間生成物として複数の生物学的な経路により生成する。これに加え、非生物学的に発生する経路も存在する。その一方、 $N_2O$ のシンクは、脱窒反応の最終段階である $N_2O$ 還元により窒素ガスに変換される経路のみに依存する。この $N_2O$ 還元反応は $N_2O$ レダクターゼを保有する $N_2O$ 還元細菌がその反応を主に担うとされている。しかしながら、 $N_2O$ 還元細菌の生理生態に関する理解は不十分であり、この細菌群を利用して $N_2O$ 排出削減を目指す技術確立には更なる研究が必要である。

$N_2O$ 還元細菌を有効に利用する技術の大きな課題の1つに、 $N_2O$ レダクターゼの温度や酸素暴露に対する感受性が挙げられる。排水処理施設は、夏季・冬季において水温が大きく異なる排水を受けるため、水温の変化により $N_2O$ 還元細菌の活性低下が懸念される。また、 $N_2O$ レダクターゼは、酸素により容易に阻害されてしまう。したがって、温度や酸素暴露に対して耐性の高い $N_2O$ 還元細菌を選出し、動力学的特性に基づいた $N_2O$ 還元細菌が活性を示す環境を創製する必要がある。また、排水処理施設の生物反応槽内にてバイオフィームを形成させて、空間的に嫌気的条件を創出するバイオリアクターの設計も重要である。

そこで本研究では、排水の $N_2O$ 生成・消費の機構解明や高効率に $N_2O$ 消費を行える細菌群の生理生態解明を行う。また、ガス透過膜を用いたバイオフィームリアクターを設計し、 $N_2O$ 排出削減という課題のボトルネックである、 $N_2O$ 還元細菌の活性を常に高くするような環境創製を目指す。これらの目的のため、中空状のガス透過膜を用い、膜の内孔より窒素・酸素・亜酸化窒素を含む曝気槽の排気ガスを模倣したガスを供給し、中空状のガス透過膜外側にバイオフィームを形成させる新規バイオプロセスを提案した。このバイオフィームでは、外側からは排水中の有機物や窒素化合物などの溶存成分が供給される一方、内側からは酸素などのガスが供給される。このような対向拡散型の基質供給方式は、有機物・窒素化合物などの溶存成分と酸素がバイオフィームの外側から供給される、従来の並行拡散型の基質供給方式と大きく異なる。

### 2. 研究の目的

本研究では、1.で記述した新規プロセスの提案に向け、以下の5点について検討を行い、新規バイオフィームリアクターのコンセプトの実現可能性を評価した。

- (1) 実排水処理施設における $N_2O$ 生成機構の解明
- (2) 対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクターにおける $N_2O$ 生成量と生成メカニズムの評価
- (3) 対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクターの微生物叢解析
- (4) 高活性 $N_2O$ 還元細菌の動力学解析と温度・酸素濃度が $N_2O$ 消費速度に及ぼす影響評価
- (5) 循環型硝化脱窒法の無酸素槽で発生する $N_2O$ の生成量評価

これらの知見を統合することにより、ガス透過膜に排気ガスを通気することをコアとする、新規バイオフィームプロセスの開発に向けた指針を得ることとした。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 実生活排水処理施設における $N_2O$ 生成機構解明

下水処理場を対象とした過去の調査では、初沈汚泥、余剰汚泥、および他処理場からの混合生汚

泥が流入する汚泥混合槽が、主要な  $\text{N}_2\text{O}$  排出源であることが明らかになっている。しかし、下水処理場の汚泥処理工程における  $\text{N}_2\text{O}$  発生機構の検討事例は限られており、その機構解明は喫緊の課題である。そこで、最終沈殿池から持ち込まれた  $\text{NO}_3^-$ -N が余剰汚泥に微量に残存し、これが初沈汚泥を電子供与体として脱窒される際に、低 pH の混合生汚泥と混合されることで  $\text{N}_2\text{O}$  から  $\text{N}_2$  への還元が阻害されることが、 $\text{N}_2\text{O}$  の蓄積機構であるとの仮説を立て、ラボスケールリアクターを用いた基礎実験により仮説の検証を試みた。

上記の下水処理場で初沈汚泥（汚泥 A）と他の下水処理場からの混合汚泥（汚泥 B）を採取した。汚泥 A および B から成る混合汚泥（汚泥 A：汚泥 B = 1：4）2 L をリアクターに密閉し、嫌気条件下で攪拌することで実験を行った。 $\text{NO}_3^-$ -N 濃度の影響を調査するため、 $\text{NO}_3^-$ -N 標準液を添加しない系（Run 1, MLSS 17,200 mg/L）と、添加する系（Run 2, MLSS 17,600 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N 1.5 mg-N/L）の 2 系列の実験を行った。処理場汚泥混合槽の観測値を考慮し pH は  $5 \pm 0.1$  に設定した。実験中は、液相中  $\text{N}_2\text{O}$  (D- $\text{N}_2\text{O}$ ) 濃度、溶存酸素 (DO) 濃度および pH を常時モニタリングした。所定時間経過後、ヘッドスペース中の  $\text{N}_2\text{O}$  (G- $\text{N}_2\text{O}$ ) を測定するとともに、リアクターから汚泥を採取し、液相中  $\text{NO}_3^-$ -N および硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) の濃度を測定した。実験中は、水温  $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$  に調整した。

### 3.2 対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクターにおける $\text{N}_2\text{O}$ 生成量と生成メカニズムの評価

対向拡散型と従来法の並行拡散型基質供給方式のバイオフィームを模倣したフローセルリアクター（容積 200 mL）を作製し、流入する人工排水中の有機物・窒素化合物の濃度比を変化させて硝化・脱窒性能、 $\text{N}_2\text{O}$  の排出量を比較した。人工排水は有機物濃度 600 mg-C/L、窒素濃度 200 mg-N/L (C/N 比 3) と有機物濃度 200 mg-C/L、窒素濃度 200 mg-N/L (C/N 比 1) の 2 つを作製し、滅菌後各リアクターに連続通水した。全溶存有機炭素濃度、全溶存窒素濃度、イオン態の窒素化合物濃度を追跡することにより、対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームの有機物・窒素除去性能を評価した。処理性能が安定した後、先端径が数十  $\mu\text{m}$  の一酸化窒素 ( $\text{NO}$ )、D- $\text{N}_2\text{O}$  および DO の微小電極を形成されたバイオフィームに適用し、バイオフィーム内の  $\text{N}_2\text{O}$  生成と消費のホットスポットの同定を行った。

### 3.3 対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクターの微生物叢解析

3.2 で運転した対向拡散および並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクター内の微生物叢を評価するため、16S rRNA 遺伝子に基づくアンプリコンシーケンスを実施した。定点観測では、両リアクターの有機物・窒素除去性能が定常状態に到達した際、バイオフィームサンプルの空間構造を保持して採取し、即時にポリマー包埋剤に浸漬させて凍結させ、クライオマイクロトームで氷切片を作製した。作製した氷切片バイオフィームから DNA 抽出を行い、16S rRNA 遺伝子に基づく微生物叢解析を行った。また、バイオフィームの一部を時系列的に採取し、バイオフィーム全体の微生物叢を 16S rRNA 遺伝子に基づくアンプリコンシーケンスに適用した。得られたデータは 16S rRNA 遺伝子のデータベースと照合し、各サンプルの微生物叢の組成を評価した。さらに、予測メタゲノム法を適用して (Langille *et al.*, 2013, *Nature Biotechnol.* 31: 814-821)、 $\text{N}_2\text{O}$  生成、 $\text{N}_2\text{O}$  消費の機能を有する細菌群の絞り込みを行った。

### 3.4 高活性 $\text{N}_2\text{O}$ 還元細菌の動力学解析と温度・酸素濃度が $\text{N}_2\text{O}$ 消費速度に及ぼす影響評価

$\text{N}_2\text{O}$  を効率的に消費可能な *Azospira* sp. I13 株のゲノムを構築し、窒素変換に関連する遺伝子群の解析を行った。さらに、排水処理施設においてダイナミックに変動する水温と DO 濃度を体系的に変化させ、*Azospira* sp. I13 株の  $\text{N}_2\text{O}$  消費活性を動力的観点から評価した。実験では、DO および D- $\text{N}_2\text{O}$  の微小電極を挿入可能な容積 10 mL から成るダブルポートチャンバーを用意し、*Azospira* sp. I13 株のほかに、*Azospira* sp. I09 株、*Paracoccus denitrificans*、*Pseudomonas stutzeri* の 4 種類の細胞懸濁液を異なる水温 ( $15\sim 35^\circ\text{C}$ ) に適用した。各温度での DO 濃度、D- $\text{N}_2\text{O}$  濃度を追跡することにより、酸素と  $\text{N}_2\text{O}$  の活性化エネルギーを算出した。また、それぞれの水温において、好気条件に各細菌を暴露させた後に、 $\text{N}_2\text{O}$  消費の活性回復の時系列変遷を定量的に評価した。

バイアルに  $^{15}\text{N}$  安定同位体でラベルされた  $^{15}\text{NO}_3^-$  と非ラベルの  $\text{N}_2\text{O}$  を添加して、異なる分子量の  $\text{N}_2\text{O}$  および  $\text{N}_2$  を追跡することにより、真の  $\text{N}_2\text{O}$  生成速度、真の  $\text{N}_2\text{O}$  消費速度を算出する手法を検討した。この手法を用い、*Azospira* sp. I13 株と *Pseudomonas stutzeri* の  $\text{N}_2\text{O}$  生成速度と  $\text{N}_2\text{O}$  消費速度の評価を行った。

### 3.5 循環型硝化脱窒法の無酸素槽で発生する $\text{N}_2\text{O}$ の生成量評価

循環型硝化脱窒法の無酸素槽にバイオフィームが付着している中空状ガス透過膜を投入する際、無酸素槽で発生する  $\text{N}_2\text{O}$  が十分に消費され、窒素ガスに変換される必要がある。そこで、基礎試験として無酸素槽の活性汚泥により発生する  $\text{N}_2\text{O}$  生成量を評価した。攪拌翼を設置した容積 3L の完全混合型脱窒リアクターを作製し、活性汚泥を MLSS 1,000 mg/L となるように投入した。生活排水を模擬した人工排水（有機物 72 mg-C/L、 $\text{NO}_3^-$  20 mg-N/L）をリアクター内に供給し、回分的にイオン態窒素化合物および D- $\text{N}_2\text{O}$  濃度のモニタリングを実施した。活性汚泥の脱窒反応における  $\text{N}_2\text{O}$  生成速度、 $\text{N}_2\text{O}$  消費速度を見積もった。この結果をもとに  $\text{N}_2\text{O}$  排出削減に必要なガス透過膜の表面積を見積もり、ガス透過膜を導入することの実現可能性を評価した。

## 4. 研究成果

### 4.1 実生活排水処理施設における $\text{N}_2\text{O}$ 生成機構解明

Run 1 では、D- $\text{N}_2\text{O}$  はわずかに上昇し、汚泥 A および B を混合することにより、 $\text{N}_2\text{O}$  が生成されることが示された。Run 2 では、 $\text{NO}_3^-$ -N 濃度の低下にともない、 $\text{N}_2\text{O}$  の蓄積が確認された。120 分経過後の全  $\text{N}_2\text{O}$  および  $\text{NO}_3^-$ -N の合計量（2.6 mg-N）は、初期の合計量（3.0 mg-N）と同等であったことから、投入した窒素は  $\text{N}_2\text{O}$  として残存し、脱窒過程における  $\text{N}_2\text{O}$  から  $\text{N}_2$  への反応経路が阻害されたことが示唆された。既往研究では、 $\text{H}_2\text{S}$  濃度 2 mg-S/L で  $\text{N}_2\text{O}$  レダクターゼの活性が 2% まで低下することが報告されている（Pan *et al.*, 2013, *Environ. Sci. Technol.* 47: 8408-8415）。本研究では、初期  $\text{H}_2\text{S}$  濃度は約 40 mg-S/L と極めて高く、かつ本研究で検討した pH 領域（pH5）では  $\text{H}_2\text{S}$  のみの形態となるため（ $\text{pK}_{a1}=7.02$ 、 $\text{pK}_{a2}=13.9$ ）、 $\text{N}_2\text{O}$  還元阻害が容易に生じたと考えられた。以上より、低 pH 条件の汚泥混合槽に微量の  $\text{NO}_3^-$ -N が混入することで高濃度の  $\text{N}_2\text{O}$  が生成しうることが示された。

### 4.2 対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクターにおける $\text{N}_2\text{O}$ 生成量と生成メカニズムの評価

C/N 比 1 および 3 の人工排水において、有機物の除去性能はどちらのバイオフィームリアクターにおいても統計的な優位な差は見られなかった。一方、窒素化合物の除去性能は提案する対向拡散型基質供給方式のバイオフィームの方が高くなった。排出される  $\text{N}_2\text{O}$  の生成量は、適用した有機物・窒素化合物の濃度比において、対向拡散型基質供給方式が 1-2 桁小さい値となった。対向拡散型基質流入方式のバイオフィームが有機物と窒素を含んだ排水処理において、高い窒素除去性能を達成しつつ、 $\text{N}_2\text{O}$  排出抑制にも効果を示すことを実証した。処理性能が安定した際のバイオフィーム内の D- $\text{N}_2\text{O}$ 、脱窒反応における  $\text{N}_2\text{O}$  の前駆体の溶存態 NO の濃度プロファイルを微小電極により取得した。その結果、対向拡散型バイオフィーム内において、NO から  $\text{N}_2\text{O}$ 、および  $\text{N}_2\text{O}$  から  $\text{N}_2$  への還元反応が行われる部位は、酸素供給が行われる最深部に近く、隣接していることが示された。さらに、対向拡散型基質供給方式のバイオフィームで見られた  $\text{N}_2\text{O}$  消費が起こる部位は、 $\text{N}_2\text{O}$  還元細菌の存在量が高いことが分かった。対向拡散型基質供給方式のバイオフィームで生成した  $\text{N}_2\text{O}$  は、 $\text{N}_2\text{O}$  還元細菌により即座に  $\text{N}_2$  に変換されることが示され、対向拡散型基質供給方式のバイオフィームが  $\text{N}_2\text{O}$  削減に有利であるメカニズムを提示できた。

### 4.3 対向拡散型・並行拡散型基質供給方式のバイオフィームリアクターの微生物叢解析

提案した対向拡散型基質供給方式のバイオフィーム中に生息するアンモニア酸化細菌の空間分布を顕微鏡検出したところ、ガス透過膜から酸素が供給されるバイオフィーム最深部で優占的に存在していることを示した。16S rRNA 遺伝子のアンプリコンシーケンスの結果、対向拡散型基質供給方式および並行拡散型基質供給方式のバイオフィームに拘わらず、従属栄養細菌の *Comamonadaceae* 科、*Rhodocyclaceae* 科、*Xanthomonadaceae* 科、*Saprospiraceae* 科が優占種とし

て選出された。バイオフィルムの深さ方向に対するこれらの細菌群の存在比は予想に反して大きな変遷が見られなかった。予測メタゲノム法により、*Comamonadaceae* 科、*Rhodocyclaceae* 科、*Xanthomonadaceae* 科が  $N_2O$  の生成に關与する可能性のある細菌群として検出された。一方、*Rhodocyclaceae* 科、*Saprospiraceae* 科が  $N_2O$  の消費に關与する可能性のある細菌群として検出された。*Rhodocyclaceae* 科に屬する *Azospira* 属の数種類の細菌の分離培養に成功したため、特に *Azospira* sp. I13 株を有用な  $N_2O$  還元細菌として選出し、さらに生理生態に關する評価を進めることにした。

#### 4.4 高活性 $N_2O$ 還元細菌の動力学解析と温度・酸素濃度が $N_2O$ 消費速度に及ぼす影響評価

4.3 で選出された *Rhodocyclaceae* 科 *Azospira* 属の *Azospira* sp. I13 株のゲノム解析の実施した結果、硝酸イオンから窒素ガスまでの一連の脱窒反応を担う酵素群を保有していること、 $N_2O$  レダクターゼをコードする *nosZ* 遺伝子は Clade II タイプであることが明らかになった。*Azospira* sp. I13 株、I09 株、*Paracoccus denitrificans*、*Pseudomonas stutzeri* の計 4 種類の脱窒細菌に対し、酸素および  $N_2O$  への基質親和性と活性化エネルギーを評価した。その結果、*Azospira* sp. I13 株、I09 株が  $N_2O$  に対して高い親和性を有することが明らかになり、*Azospira* sp. I13 株、I09 株が優れた  $N_2O$  消費性能を有する可能性が示された。さらに、*Azospira* sp. I13 株は酸素暴露後の  $N_2O$  消費の活性回復に優れていることを示した。一方、*Azospira* sp. I13 株の酸素および  $N_2O$  の活性化エネルギーが他の脱窒細菌に対して 2 倍程度の高いことが明らかになり、*Azospira* sp. I13 株は  $30^\circ C$  以降において非常に優れた  $N_2O$  消費を行えるが、低温環境ではこの利点を十分に活かさない可能性を示唆した。

$N_2O$  は脱窒反応の中間反応物としても生成される。よって、実験系で検出される  $N_2O$  濃度は  $N_2O$  の消費と生成の正味のものになる。実際に微生物がポテンシャルとして保有する  $N_2O$  生成速度、消費速度を正確に追跡するため、嫌気条件にて安定同位体  $^{15}N$  でラベルされた硝酸イオン ( $^{15}NO_3^-$ ) を分子量 44 の  $N_2O$  と同時に供給した。分子量の異なる  $N_2$  および  $N_2O$  を定量することで真の  $N_2O$  生成速度、消費速度を精査する手法を検討した。窒素収支の追跡により、この手法の妥当性を評価できた。この手法を用い、*Azospira* sp. I13 株、*Pseudomonas stutzeri* の 2 種類の脱窒細菌を評価したところ、*Azospira* sp. I13 株は、真の  $N_2O$  生成速度に対し、真の  $N_2O$  消費速度が相対的に高くなることが示唆された。*Azospira* sp. I13 株が優れた  $N_2O$  還元細菌であることを定量的に示せた。

#### 4.5 循環型硝化脱窒法の無酸素槽で発生する $N_2O$ の生成量評価

回分試験の結果、 $NO_3^-$  の還元に伴い、 $NO_2^-$  の蓄積が見られず、D- $N_2O$  の上昇が見られた。還元された  $NO_3^-$  の半量が D- $N_2O$  として検出された。 $NO_3^-$  の枯渇後、D- $N_2O$  および G- $N_2O$  濃度の急激な減少が観察され、1 時間以内に D- $N_2O$  濃度は検出下限値に到達した。これらの結果より、 $N_2O$  の生成速度および  $N_2O$  の消費速度を見積もったところ、1~10 mg-N/L/h の範囲であった。これまで評価してきた *Azospira* sp. I13 株をはじめとする  $N_2O$  還元細菌による  $N_2O$  消費活性、ガス透過膜に固定化可能な細菌量、ガス透過膜から供給される  $N_2O$  量を試算した結果、ガス透過膜を無酸素槽への浸漬する量はわずかで済み、提案するバイオフィルムプロセスの実現性は高いことが考えられた。今後、循環式硝化脱窒法の無酸素槽にガス透過膜を充填したシステムを運転し、コンセプトの妥当性を検討する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suenaga, T., Aoyagi, R., Sakamoto, N., Riya, S., Ohashi, H., Hosomi, M., Tokuyama, H. and Terada, A.	4. 巻 126
2. 論文標題 Immobilization of Azospira sp strain I13 by gel entrapment for mitigation of N2O from biological wastewater treatment plants: Biokinetic characterization and modeling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Bioscience and Bioengineering	6. 最初と最後の頁 213-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiosc.2018.02.014	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 -
1. 著者名 Yokota, N., Mineshima, R., Yamaguchi, H., Hirase, T., Ishikawa, H., Azuma, T., Hosomi, M. and Terada, A.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Startup, performance, and microbial communities of an anammox reactor inoculated with indigenous sludge for the treatment of high-salinity and mesophilic underground brine	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Clean Technologies and Environmental Policy	6. 最初と最後の頁 1001-1011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10098-019-01688-y	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 -
1. 著者名 Suenaga, T., Aoyagi, T., Hosomi, M., Hori, T., Terada, A.	4. 巻 6
2. 論文標題 Draft genome sequence of Azospira sp. strain I13, a nitrous oxide-reducing bacterium harboring clade II type nosZ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Genome Announcements	6. 最初と最後の頁 e00414-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1128/genomeA.00414-18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kinh, C. T., Riya, S., Hosomi, M., Terada, A.	4. 巻 245
2. 論文標題 Identification of hotspots for NO and N2O production and consumption in counter- and co-diffusion biofilms for simultaneous nitrification and denitrification	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 318 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2017.08.051	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 -

1. 著者名 Sabba, F., Terada, A., Wells, G., Smets, B.F., Nerenberg, R.	4. 巻 102
2. 論文標題 Nitrous oxide emissions from biofilm processes for wastewater treatment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Microbiology and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 9815-9829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00253-018-9332-7	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 該当する

1. 著者名 Suenaga, T., Hori, T., Riya, S., Hosomi, M., Smets, Barth F., Terada, A.	4. 巻 53
2. 論文標題 Enrichment, Isolation, and Characterization of High-Affinity N2O-Reducing Bacteria in a Gas-Permeable Membrane Reactor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 12101-12112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.9b02237	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 該当する

1. 著者名 Agrawal, S., Kinh, C. T., Schwartz, T., Hosomi, M., Terada, A., Lackner, S.	4. 巻 152
2. 論文標題 Determining uncertainties in PICRUSt analysis - An easy approach for autotrophic nitrogen removal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biochemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 107328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bej.2019.107328	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 該当する

1. 著者名 Yasuda, S., Toyoda, R., Agrawal, S., Suenaga, T., Riya, S., Hori, T., Lackner, S., Hosomi, M., Terada, A.	4. 巻 in press
2. 論文標題 Exploration and enrichment of methane-oxidizing bacteria derived from a rice paddy field emitting highly concentrated methane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Bioscience and Bioengineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 0.1016/j.jbiosc.2020.04.006	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 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 藤川真理子, 野村洋平, 末永俊和, 寺田昭彦, 藤原 拓
2. 発表標題 下水汚泥処理工程における亜酸化窒素排出メカニズムの検討
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田琢, 末永俊和, 細見正明, 寺田昭彦
2. 発表標題 アナムモックス汚泥に棲息するN <sub>2</sub> O還元細菌のポテンシャル評価
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野哲, 末永俊和, 細見正明, 寺田昭彦
2. 発表標題 排水中の微量元素が部分硝化法におけるN <sub>2</sub> O生成に及ぼす影響
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺田昭彦
2. 発表標題 工学システムの進展から見る窒素マネジメントの現状と課題
3. 学会等名 第70回日本生物工学会大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田昭彦
2. 発表標題 対抗拡散型バイオフィームによる水処理技術：窒素除去の観点から見た利点と課題
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Terada, A., Kinh, C.T., Suenaga, T., Hori, T., Riya, S., Hosomi, M.
2. 発表標題 A membrane-aerated biofilm reactor for efficient single-stage nitrogen removal and mitigation of nitrous oxide emission: Proof-of-concept from biofilm depth profile analysis
3. 学会等名 IWA Water Reuse 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田昭彦
2. 発表標題 バイオフィームに関する最新の研究動向：形成抑制から利用技術まで
3. 学会等名 第20回日本水環境学会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiko Terada
2. 発表標題 Nitrous oxide emission from cost-effective nitrogen removal systems: Mechanisms and mitigation strategies
3. 学会等名 2017 International Conference on Environmental Pollution Control（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiko Terada
2. 発表標題 Counter-current substrate diffusion biofilm as an innovative strategy for effective nitrogen removal from wastewaters: Principles, performances and in situ biofilm analyses
3. 学会等名 The 8th China-Japan Symposium on Chemical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Qian Yang, Sijing Jia, Shaolan Ding, Taku Fujiwara
2. 発表標題 Effect of nitrate and hydrogen sulfide on N <sub>2</sub> O emission in sewage sludge treatment system
3. 学会等名 The 10th CESE Conference International Conference in Challenges in Environmental Science & Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiko Terada
2. 発表標題 Membrane-aerated biofilm reactors for nitrogen removal and mitigation of nitrous oxide emission from wastewater streams
3. 学会等名 EnvironmentAsia 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiko Terada
2. 発表標題 A membrane-aerated biofilm reactor for cost-effective nitrogen removal with low greenhouse gas emissions: Insights from macro and micro scale observations
3. 学会等名 The 5th EnvironmentAsia International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺田昭彦
2. 発表標題 ガス透過膜を用いたバイオフィルムリアクターの 省エネ化・高機能化に向けた現状と課題
3. 学会等名 第36回ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suenaga, T., Ota, T., Hori, T., Riya, S., Hosomi, M., Chandran, K., Lackner, S., Smets, B.F., Terada, A.
2. 発表標題 Activity, abundance, and identification of N <sub>2</sub> O-reducing bacteria present in Anammox biomass - Combination of <sup>15</sup> N tracer and molecular analyses
3. 学会等名 The 8th IWA Microbial Ecology and Water Engineering Specialist Conference (MEWE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiko Terada
2. 発表標題 Counter-current substrate diffusion biofilms for nitrogen removal from wastewaters
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Non-point Source Pollution Control and Aquatic Ecosystem Protection (NPAE-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大場康平、末永俊和、利谷翔平、寺田昭彦
2. 発表標題 15Nトレーサー法を用いた脱窒細菌のN <sub>2</sub> O還元ポテンシャルの評価
3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiko Terada
2. 発表標題 A Membrane-aerated Biofilm Reactor for Effective Nitrogen Removal from Wastewaters: Opportunities and Challenges
3. 学会等名 IEEC & BWR 2019 (招待講演) (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	藤原 拓 (Fujiwara Taku)  (10314981)	高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・教授  (16401)	
研究分担者	堀 知行 (Hori Tomoyuki)  (20509533)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員  (82626)	
研究協力者	末永 俊和 (Suenaga Toshikazu)  (80828377)	東京農工大学・グローバルイノベーション研究院・特任助教  (12605)	