

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04405

研究課題名(和文) 下水管路内浄化における間欠接触酸化の微生物相への影響

研究課題名(英文) Effects of intermittent contact oxidation on microbial population in in-sewer purification

研究代表者

佐藤 弘泰 (Sato, Hiroyasu)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90251347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は間欠接触酸化法と呼ぶ原理を用いて下水を管路内で浄化する技術の開発、および、そこに存在する微生物への影響について検討しようというものである。下水の流下が間欠的な時、下水の水位が低下し微生物担体が直接空気に晒される。間欠接触酸化法はその際に微生物に酸素が供給されることに着目し、電力エネルギーを消費することなく下水を浄化しようというものである。本研究ではその性能を明らかにすることができた。スポンジ設置面積あたり、条件にもよるが概ね30g/m<sup>2</sup>/d程度の性能を得ることができる。一方、微生物相への影響の解明については今後の課題として残った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近代下水道は下水の収集システムとしての下水道と処理装置としての処理場に明確に区別されている。本研究は、下水道管路の水質浄化機能をたかめ、処理機能の一部を担わせることが可能であることを実験レベルで示した。さらに、本研究の用いる技術は電力を消費しない省エネルギー型技術である。人口密度の高い大都市には向かないが、大都市周辺や人工減少地域に適用できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The present study aimed to develop a technology to treat sewage inside sewer pipe based on a principle named intermittent contact oxidation process (ICOP), and to clarify the effect of the condition on microorganisms. When sewage flow is low, water level decreases, and microbial media installed exposed to air. In ICOP, oxygen is supply to microorganisms when microbial media is exposed to air, and the process does not consume electrical power. In the present study, the performance of ICOP was clarified. Areal oxygen supply capacity was estimated to be around 30g/m<sup>2</sup>/d though it depends on conditions. On the other hand, effects of ICOP conditions on microorganisms remained to be studied in the future.

研究分野：環境工学、環境微生物学、下水道学

キーワード：間欠接触酸化法 管路内下水浄化 干出ストレス 下水道

### 1. 研究開始当初の背景

下水の浄化は通常は下水処理場でおこなわれるが、下水管路の持つ自浄作用を高めて処理場流入前の前処理をするという考え方がある。そうした能力を持つ浄化管が開発され(図1)特に二層構造管については試行的にはあるが社会実装された事例も存在する。新たな技術として、学術的理解を進化させることが期待される。特に、下水との接触(水没)と空気との接触(干出)が繰り返される間欠接触酸化条件が微生物の働きに及ぼす影響についてはほとんど何もわかっていない。その一方、社会実装を進める上では構造がより簡単な図1の単層構造管にも期待がかかる。しかし、その性能は十分にわかっていない。

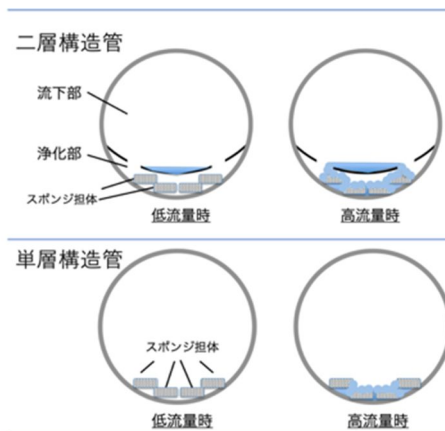


図1 2種類の浄化管の構造

### 2. 研究の目的

上記の状況のもと、当初は間欠接触酸化条件が微生物の働きに及ぼす影響を明らかにすること、単相構造管の性能を評価すること、また、単相構造管に適した微生物担体を明らかにすること、また、間欠接触酸化法はエネルギー消費が少ない新たな水処理技術であり、その原理を活用した技術を管路に限らず検討することとした。さらに、管路内浄化の適用性について、人口密度や人口一人当たりの管路長の観点から検討した。

### 3. 研究の方法

単層構造管の性能の検討については、大きくは次の三つの検討を行なった。(1)油脂をモデル基質とした検討、(2)管路最上部を想定した検討、(3)実下水を用いた検討。さらに(1)については、(1-1)スポンジの構造の検討、(1-2)流下条件の影響の検討、(1-3)模擬下水を用いた性能の評価、の三つに分けて検討した。

実験(1)~(3)は、概ね図2に示す装置を用いて実施した。いずれの場合もスポンジ担体を設置した水路に間欠的に下水または人口下水を流下させる。また、装置はガasketおよびクランプで蓋を押さえ、また、外部との接続はゴム栓やシリコンシーラントを用い、さらに流出部は水面下にもうけて水封することで、気密にした。装置内の酸素濃度を酸素ガスセンサーによって連続的に監視する。

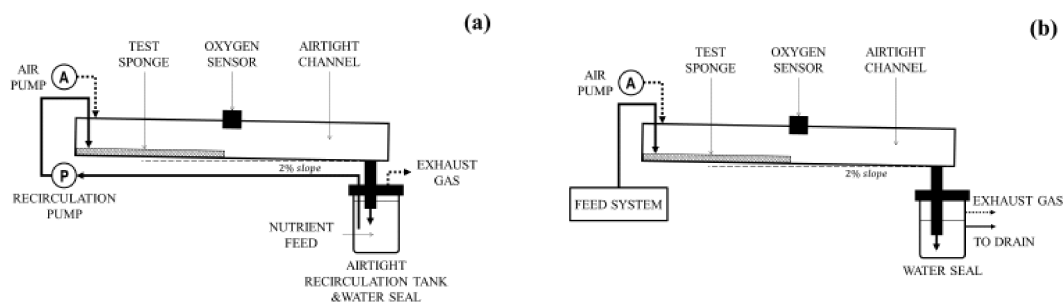


図2 実験装置. (a)循環型装置、(b)掛流し型装置

実験(1-1)、(1-2)、実験(3)は循環式であり、必要に応じて循環水槽内の下水または人口下水を入れ替える。一方、実験(1-3)および実験(2)は掛け流し式の装置を用いた。

実験(1-1)、(1-2)ではスポンジ内部蓄積された油脂の分解挙動を把握しようというアプローチを取った。マーガリンを染み込ませた不織布をスポンジの下部(一部実験では上部)におき、そこに無機栄養塩溶液を人口下水として流下させた。一方実験(1-3)は人工下水にオレイン酸またはオレイン酸とペプトンの混合液を基質として用いた。

実験(2)では、下水管最上流部への適用を模擬して実験した。下水と微生物担体との接触時間は非常に短くなると考えられるが、微生物の中には極めて速やかに基質を非酸化的に摂取する能力を有する微生物も存在する。そうした微生物による除去効果を期待して、濃厚な人工下水を流下させたのち一定時間経過後に水道水を流下させる実験を実施した。

実験(3)は実下水処理場に装置を設置し、最初沈殿池越流水相当の下水を负荷した。

一方、間欠接触酸化法を応用し、下水処理場の余剰汚泥を削減する検討を実施した(実験4)。用いた装置は図2の循環式のものであり、汚泥を循環させる頻度や微生物担体の厚さを変更し、汚泥の酸化分解速度や処理後の汚泥の沈降性を検討した。また、スポンジ担体に汚泥を负荷したのちの微生物相の変化をPCR-RFLP法で検討した。

最後に管路内浄化の適用性についての検討(シナリオ解析)は、研究室周辺の107haの住宅

地を対象として、下水管路長 31,456m、うち 4,561m が幹線管路とし、世帯人員 4 名、さらに宅地から下水道への取付管を 1 世帯あたり 10m、とし、(シナリオ 1)全て既存の管とした場合、(シナリオ 2)下水管に浄化管を用いた場合(枝管は単層構造管、幹線は二層構造管)、(シナリオ 3)(シナリオ 2)に加え取付管にも単層構造管を用いた場合の三つについて、人口密度 10~1000 人/ha の間で管路内浄化導入の効果を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1)実験(1-1)の結果

実験(1-1)の結果を図3に示す。孔径3種類(0.3mm、0.55mm、0.9mm)厚さ0cm~1.5cmのスポンジを基質(マーガリン)を染み込ませた不織布シートの上に設置し、微生物が生育したのちに酸素消費速度を測定した。0.3mm、0.55mmのスポンジではスポンジ厚さが厚くなると酸素の輸送が制限され酸素消費速度が低下したのに対し、0.9mmのスポンジでは酸素消費速度はスポンジ厚さの影響は軽微にとどまった。また、スポンジ厚が薄い場合でも、0.3mmのスポンジがもっとも高い酸素消費速度を示した。このことから、間欠接触酸化法ではスポンジの孔径は大きめの方が良いことがわかった。なお、0.9mm以上の孔径のスポンジについては入手できなかったため検討していないが、微生物が生育しにくく性能が上がりにくくなると予想した。

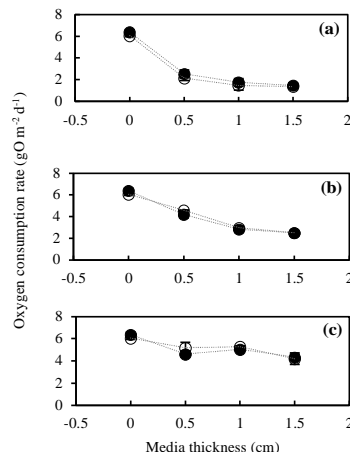


図3 実験(1-1)の結果. スポンジ孔径(a) 0.3mm、(b)0.55mm、(c)0.9mm. Sotelo et al. <sup>1)</sup>

##### (2)実験(1-2)の結果

実験(1-2)では、厚さ1cmのスポンジを基質(マーガリン)を染み込ませた不織布状に設置し、そこに、(a)4時間ごとに5分無機栄養塩溶液を流下させるケース、(b)20分ごとに5分無機栄養塩溶液を流下させるケース、(c)(a)と(b)を4時間ごとに交互に繰り返すケース、の三つの条件で流下条件の影響を検討した。実験に先立って、スポンジにバイオフィルムを84日間純血定着させた。結果を図4に示す。横軸は新たな基質付不織布を設置してからの経過時間である。流下頻度の高いIIでは孔径0.55mmのスポンジがもっとも良い成績だったが、条件Iおよび条件IIIでは孔径0.9mmのものがもっともよい成績を示した。このことから、流下の頻度が小さい時には孔径の大きなスポンジが有利であり、一方、流下頻度が高くなると孔径がより小さなスポンジが有利になる場合があることがわかる。流下頻度が高い場合、流下してくる水に含まれて溶存酸素がスポンジ内奥にまで供給される場合があり、それが、空気が入りにくい目の小さなスポンジでも高い性能を発揮できる理由であると考えられた。

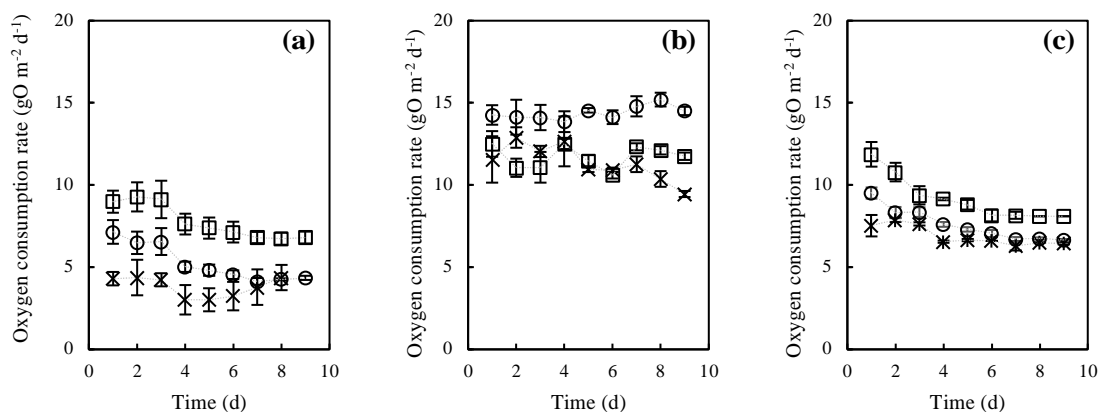


図4 実験(1-2)の結果2). (a)、(b)、(c)は流下パターン(本文参照). Sotelo et al. <sup>2)</sup>

##### (3)実験(1-3)の結果

実験(1-1)、(1-2)はスポンジの孔径や厚さ、流下特性がスポンジ下部に蓄積された有機物の酸化分解に及ぼす影響について検討した。実験(1-3)では実下水の流れに近い条件で、単層構造管を用いた単層構造浄化管の性能を把握しようとした。結果の一部を図5に示す。

オレイン酸、またはオレイン酸とペプトンの混合物を有機基質として含む人工下水を、馴養期間中(図5の期間I)は4時間ごとに4分間掛け流しで供給した。その後、負荷の影響等の検討を実施したが、79日目に微生物膜を人為的に剥離し、その影響を検討した。

なお、馴致期間中、初期には酸素消費はほとんど見られなかったが、それでもCODの良好な除去が見られ、物理化学的な吸着が大きく寄与しているものと推測された。

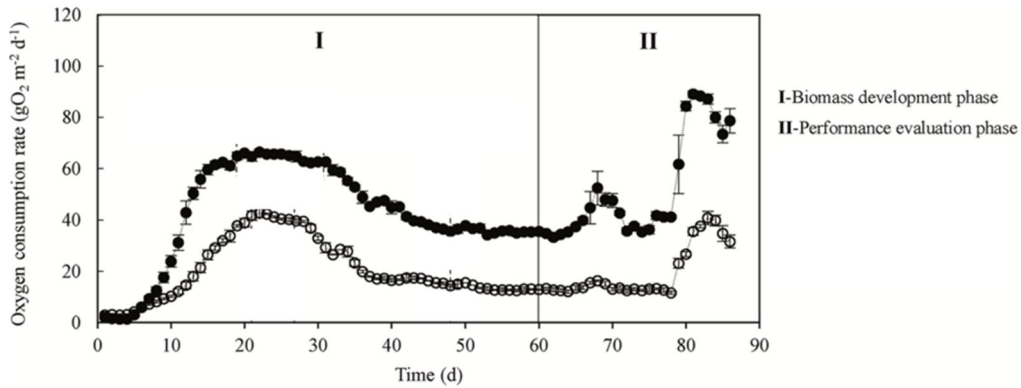


図5 実験(1-3)の結果. □: オレイン酸基質、●: オレイン酸・ペプトン混合基質 Sotelo et al. <sup>3)</sup>

実験期間全体を通じてオレイン酸のみを基質とした場合の方が酸素消費が活発だった。ペプトンの方が生分解性は高いと考えられたが、投与されたペプトンのほとんどは微生物によって吸収されることなく流下したためだと考えている。また、馴致期間中、一度高くなった酸素消費速度は、やがて30日目ごろから低下し、45日目ごろから再び安定した。微生物の密度が高くなり、スポンジ表面が目詰まりを起こしたためであると考えられる。しかし、それでも最大時の半分程度の酸素消費速度を有していた。また、微生物膜を剥ぎ取ることによって、性能が著しく回復することがわかった。

微生物担体（スポンジ）によって捕捉されやすい有機物であれば、40~80gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/dの酸素消費速度を得ることが可能であることがわかった。一方、そうでない有機物については性能はそれより劣る。

#### (4) 実験(2)の結果

実験(2)では、酢酸を含む濃厚な人工下水を少量（スポンジが含む程度）に投与し、その後所定時間経過後に水道水を大量に流してスポンジ内部に残る有機物を流し去ることで、短時間の接触で水溶性の有機成分を除去する性能について検討した。

結果を図6に示す。横軸は濃厚基質投与後水道水を流下させるまでの接触時間であり、接触時間わずか5分程度の場合でも投与した基質のおよそ半分が除去されることがわかった。

#### (5) 実験(3)の結果

実験(3)は実下水（最初沈殿池越流水相当）を用いて性能の評価を行なった。結果を図7に示す。平均すると30gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d程度の性能が得られていた。

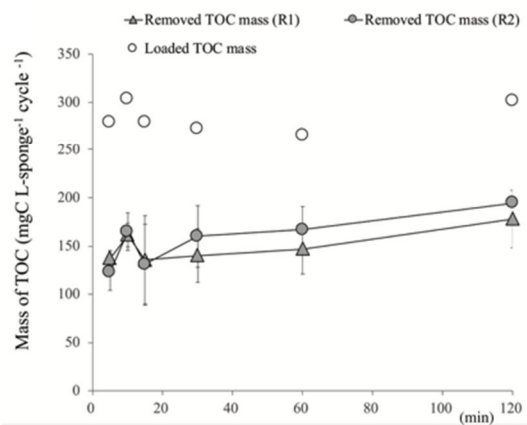


図6 実験(2)の結果 Lyu et al. <sup>4)</sup>

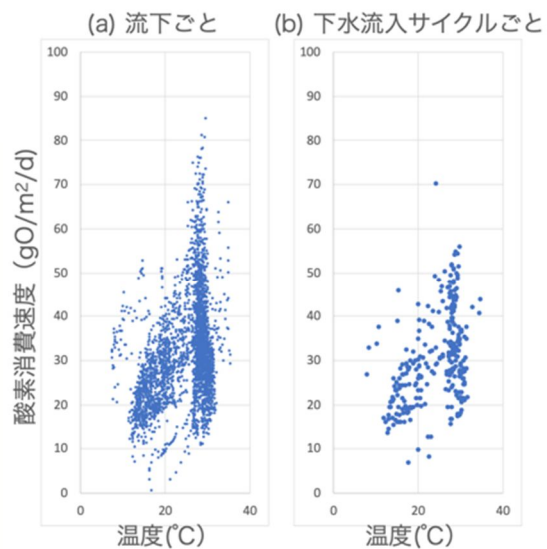


図7 実験(3)の結果 佐藤ら <sup>5)</sup>

#### (6) 実験(4)の結果

実験4では間欠接触酸化法を用いて汚泥を減量する検討を実施した。簡素な装置で汚泥を減量する技術は、特に山間部や離島の下水処理施設の汚泥管理に役立つであろうと考えたためである。下水や人工下水に代えて、循環水槽には実下水処理場から得た変装汚泥を入れた。

図8に示すように、1日あたりの循環回数に関わらず、装置内部では概ね7~10gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d程度

の酸素消費があった。また、別に行なった検討では、SVI が 180 から 60 程度に減少した。簡易に汚泥の質量を減らしつつ容積も減らすことができる可能性がある。

一方、PCR-RFLP 法では初発の微生物相のバンドパターンと投与した汚泥のバンドパターンが似通っており、区別することができなかった。

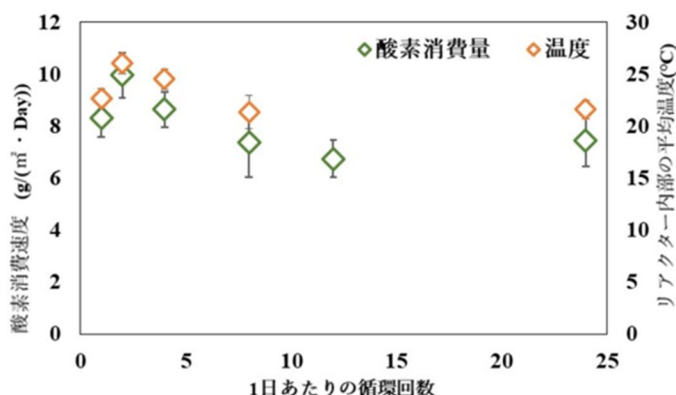


図8 実験(3)の結果. 小林<sup>6)</sup>

### (7)シナリオ解析

シナリオ解析の結果を図9に示す。管路内浄化を導入しない通常の下水管でもある程度の水質浄化が進行する。それに対して管路内浄化を導入することで、水質浄化をさらに高めることができる。特に人口密度 50~100 人/ha (一人当たり管長 5m 程度以上では発生負荷の 30~50%以上を削減できるとの試算となった。

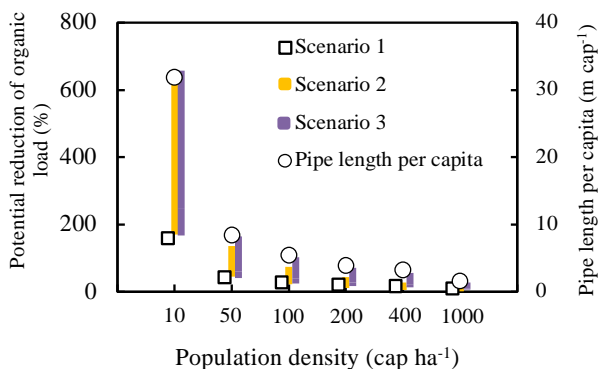


図9 シナリオ解析の結果<sup>7)</sup>

### <引用文献>

- 1) Sotelo T.J., Satoh H., Mino T. Effect of Sponge Media Structure on the Performance of the Intermittent Contact Oxidation Process for In-sewer Purification. *Biochemical Engineering Journal*, 149, 2019. (doi.org/10.1016/j.bej.2019.107254)
- 2) Sotelo T.J., Satoh H., Mino T. Effect of Flow Intermittency on Lipid Degradation Behavior during In-sewer Purification by the Intermittent Contact Oxidation Process. *Biochemical Engineering Journal*, 154, 2020 (doi.org/10.1016/j.bej.2019.107430)
- 3) Sotelo T.J., Satoh H. Enhanced Sewer Self-Purification with Porous Media: Performance Evaluation with Various Organic Loading Rates and Flow Intermittency. *Biochemical Engineering Journal*, 168, 2021 (doi.org/10.1016/j.bej.2021.107932)
- 4) Lyu R., Sotelo T.J., Satoh H., Mino T. Effect of Contact Time on the Performance of the Intermittent Contact Oxidation Process for Enhanced In-sewer Purification. *Journal of Water and Environment Technology*, 18(3), 166-174, 2020.
- 5) 佐藤弘泰, Regina Mardatillah, Tiffany Joan Sotelo. 間欠接触酸化法による管路内下水浄化: 単層方式による水質浄化性能評価. 第 53 回日本水環境学会年会講演集, p.204, 2021.
- 6) 小林駿. 間欠接触酸化法を利用した汚泥減量技術の開発と小規模下処理施設への適用可能性. 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文, 2020.
- 7) Sotelo T.J., Sioen G.B., Satoh H. Circling the Drain: A Systems Analysis of Opportunities for Enhanced Sewer Self-purification. *Journal of Environmental Management*, 288C, 2021. (doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112451)



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 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sotelo T.J., Satoh H., Mino T.	4. 巻 17
2. 論文標題 Assessing Wastewater Management in the Developing Countries of Southeast Asia: Underlining Flexibility in Appropriateness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Water and Environment Technology	6. 最初と最後の頁 287-301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2965/jwet.19-006	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 Sotelo T.J., Satoh H., Mino T.	4. 巻 149
2. 論文標題 Effect of Sponge Media Structure on the Performance of the Intermittent Contact Oxidation Process for In-sewer Purification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biochemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 107254, 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.bej.2019.107254	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 Sotelo T.J., Satoh H., Mino T.	4. 巻 154
2. 論文標題 Effect of Flow Intermittency on Lipid Degradation Behavior during In-sewer Purification by the Intermittent Contact Oxidation Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biochemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 107430, 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.bej.2019.107430	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 Shoji Tadashi, Satoh Hiroyasu, Matsubara Yoshiharu, Tamaki Satoshi, Matsuzaka Katsuo, Mino Takashi, Suda Wataru, Hattori Masahira	4. 巻 16
2. 論文標題 Effects of Attached and Suspended Biomass on the Dynamics of the Microbial Community and Wastewater Characteristics in Sewers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Water and Environment Technology	6. 最初と最後の頁 233 ~ 244
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2965/jwet.18-025	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 Sotelo Tiffany Joan, Satoh Hiroyasu, Mino Takashi	4. 巻 16
2. 論文標題 Lipid Degradation Behavior for the In-sewer Application of the Intermittent Contact Oxidation Process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Water and Environment Technology	6. 最初と最後の頁 211~219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2965/jwet.18-009	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 Sotelo T.J., Sioen G.B., Satoh H	4. 巻 288
2. 論文標題 Circling the Drain: A Systems Analysis of Opportunities for Enhanced Sewer Self-purification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 112451, 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jenvman.2021.112451	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 Lyu R., Sotelo T.J., Satoh H., Mino T.	4. 巻 18
2. 論文標題 Effect of Contact Time on the Performance of the Intermittent Contact Oxidation Process for Enhanced In-sewer Purification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Water and Environment Technology, 18(3), 166-174, 2020	6. 最初と最後の頁 166-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2965/jwet.20-002	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 Sotelo T.J., Satoh H.	4. 巻 168
2. 論文標題 Enhanced Sewer Self-Purification with Porous Media: Performance Evaluation with Various Organic Loading Rates and Flow Intermittency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biochemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 107932, 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bej.2021.107932	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15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Sotelo TJ, Satoh H., Mino T
2. 発表標題 Effect of Sponge Media on the Performance of the Intermittent Contact Oxidation Process.
3. 学会等名 9th International Conference on Sewer Processes & Networks. Aug. 27-29, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoh H, Tamaki S, Matsubara Y, Matsuzaka K, Osugi T
2. 発表標題 Demonstration of in sewer purification: Pilot study in Vietnam.
3. 学会等名 9th International Conference on Sewer Processes & Networks. Aug. 27-29, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sotelo TJ, Satoh H, Mino T
2. 発表標題 Treatment Performance of a Sewer Pipe Model Using Different Sponge Media Structures.
3. 学会等名 WET2019, Japan Society on Water Environment, July 13-14, 2019, Osaka, Japan.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lyu RT, Satoh H, Mino T
2. 発表標題 Intermittent Contact Oxidation Process under Feast-famine Condition - Implications on In-sewer Purification.
3. 学会等名 WET2019, Japan Society on Water Environment, July 13-14, 2019, Osaka, Japan.
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 佐藤弘泰
2. 発表標題 ラボスケール単層式管路内下水浄化装置の性能評価.
3. 学会等名 第55回下水道研究発表会, pp1055-1057. (2019年8月6日~8日、パシフィコ横浜会議センター)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sotelo TJ, Satoh H & Mino T
2. 発表標題 Lipid Degradation with Intermittent Surface Aeration in a Simulated Sewer System
3. 学会等名 WET2018, 日本水環境学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sotelo TJ, Satoh H & Mino T
2. 発表標題 Effect of Flow Intermittency on the Degradation Rate of Lipids by Intermittent Contact Oxidation Process
3. 学会等名 第55回下水道研究発表会、日本下水道協会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sotelo TJ, Satoh H & Mino T
2. 発表標題 Evaluation of Gas-phase Oxygen Concentration for In-situ Monitoring of Aerobic Pollutant Degradation
3. 学会等名 第55回環境工学研究フォーラム、土木学会環境工学委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井元貴、佐藤弘泰
2. 発表標題 間欠接触酸化法に用いられるスポンジ担体の保水性・排水性と酸素供給の関係性
3. 学会等名 第55回環境工学研究フォーラム、土木学会環境工学委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lyu R, Satoh H, Mino T
2. 発表標題 Introducing ICOP in-sewer Treatment Technology at Sewer Upstream: Development of Methodology
3. 学会等名 第55回環境工学研究フォーラム、土木学会環境工学委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山誠宏, 佐藤弘泰, 味埜俊
2. 発表標題 模擬管路内下水浄化装置におけるスポンジ担体中の硫酸還元領域の把握
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会、日本水環境学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤弘泰
2. 発表標題 間欠接触酸化法による有機成分の分解へのスポンジ孔径の影響
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会、日本水環境学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sotelo, T.J. and Satoh, H.
2. 発表標題 Aerobic activity during biofilm development with intermittent flow: Effect of organic loading rate on enhanced sewer self-purification
3. 学会等名 IWA Biofilms 2020 Virtual Conference: Emerging Trends and Developments (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tiffany Joan SOTELO, Hiroyasu SATOH
2. 発表標題 Lipid Composition Changes Influenced by Intermittent Flow Through Porous Media: A Performance Evaluation of Enhanced Sewer Self-Purification
3. 学会等名 WET2020, Japan Society on Water Environment
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤弘泰、Regina Mardatillah、Tiffany Joan Sotelo
2. 発表標題 間欠接触酸化法による管路内下水浄化:単層方式による水質浄化性能評価
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会講演集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ  
<https://wwmlab.info>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------