

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01160

研究課題名(和文)嫌気性微生物を用いた創エネルギー・低炭素型下水処理システムの開発

研究課題名(英文)Development of municipal wastewater system by using anaerobic microorganism

研究代表者

李 玉友 (Li, Yu-You)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：30201106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水質確保とエネルギー回収の両立を実現できる省エネルギー・低炭素型で下水処理システムを開発するために、嫌気性膜分離法(AnMBR)と担体添加型一槽式アナモックス(Anammox)法を融合した新しいシステムを構築し、実排水を用いた小規模連続試験とパイロット試験を通してその性能を評価した。前段のAnMBRユニットについてHRTと温度を変化させて実験した結果、異なる条件における処理水質、バイオガス生成量、余剰汚泥発生量を把握した。また後段の一槽式Anammoxは、滞留時間2時間で処理水のBODを10mg/L以下に、窒素(T-N)も10mg/L以下にすることができ目標を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、これまでの室内実験で得られた基礎的成果を生かして、社会実装に向けてAnMBRと一槽式ANAMMOX技術を融合した下水処理システムの実証と最適化を図ることである。開発したシステムは、既存の下水処理技術に代わり、省エネルギー効果をもたらし、低炭素社会の実現に大きく貢献するポテンシャルがある。AnMBR-Anammoxシステムの長期安定運転データを基礎として10000 m³/日処理規模のケース試算によって評価を行った結果、AnMBR-Anammoxシステムのエネルギー需要量は0.136 kWh/m³、CO₂排出量は0.098 kg/m³であり、優れた低炭素効果を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new system combining an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) and a one-stage partial nitritation/anammox (PNA) reactor was developed to realize energy-saving/energy-creation in the treatment of municipal wastewater. Both small scale and pilot scale experiments were conducted in a wastewater treatment plant. The methanogenic performance and membrane operation for AnMBR were studied by changing the HRT from 24 to 6 hours and temperature from 25 to 15 °C. The effluent COD was stable < 50 mg/L, always met the discharge standards. The one-stage PNA reactor could reduce the effluent BOD to 10 mg/L or less and T-N (total nitrogen) to 10 mg/L or less with an HRT of 2 h, thereby achieving the target values. This research proved that applying mainstream AnMBR in temperate climates can significantly reduce electricity demand and achieve energy positive.

研究分野：環境保全工学

キーワード：排水処理システム 嫌気性膜分離法 メタン発酵 バイオガス アナモックス法 窒素除去 脱炭素 省エネルギー

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

人類の生産・生活活動には多くの水を使用し、排水を大量に発生している。環境保全を目的として運営する下水処理場は生産・生活などを支える重要なインフラであり、都市に必要不可欠な施設である。しかし、従来型の下水処理システムは好気性活性汚泥法を使用しているため、曝気過程により大量なエネルギーを消耗し、また汚泥生成量が多い、温室効果ガスの排出が多いなどの問題が指摘されている。これらの問題を解決し、循環型低炭素社会を実現するために、下水処理に省エネルギー・創エネルギー型技術の導入が求められている。近年、創エネルギー型排水処理技術として嫌気性膜分離法（以下 AnMBR 法と呼ぶ）が注目されているが、人工排水でその応用可能性が検討されている。また、新しい窒素処理技術法としてアナモックス（以下 Anammox と呼ぶ）法が注目されているが、実下水処理への適用は成功していない。また、AnMBR 法と Anammox 法の融合デザインによる下水処理システムはまったく検討されていない。

2. 研究の目的

本研究は下水処理における技術革新として AnMBR 法と担体添加型一槽式 Anammox 法の融合を工夫し、実下水処理について実証することで、水質確保とエネルギー回収の両立を実現できる創エネルギー・低炭素型下水処理システムの確立を目指す。前段の AnMBR 法では嫌気性メタン生成微生物群を分離膜によって高濃度に保持することで、下水中の有機物を効率よくメタンに分解してバイオガスとして回収できるとともに、余剰汚泥の大幅な削減、良好な水質も確保できる。また後段の機能性単体を用いた一槽式 Anammox により窒素除去も可能な高度処理の機能を実現する。具体的には、小型実験装置とパイロットプラントを組み立て、次の5つの課題を検討した。

- (1) 小型 AnMBR 装置を用いた下水処理の性能評価
- (2) 小型 Anammox 装置による下水の窒素処理の性能評価
- (3) パイロットプラントを用いた AnMBR による下水処理性能の評価
- (4) パイロットプラントを用いた Anammox 法による下水の窒素処理の性能評価
- (5) 新しいシステムによる下水処理の低炭素化の評価

3. 研究の方法

- (1) 小型 AnMBR 装置を用いた下水処理の性能評価

有効容積 20 L の小型 AnMBR 反応槽を組み立て、下水処理場に設置して実下水に対する連続実験を行った。実験では、膜エレメントの孔径、水理学的滞留時間 (HRT)、温度を変化させて、実下水の処理性能、ガス生成率、膜のろ過効果など AnMBR のパフォーマンスを把握した。具体的には PDVF 膜の膜孔径 0.05 と 0.4 μm の2種類を比較した。また HRT を 12, 8, 6, 4 時間に変化させて HRT の影響を把握した後に、温度を 25、20、15 のように段階的に変化させて温度の影響を明らかにした。

- (2) 小型 Anammox 装置による下水の窒素処理の性能評価

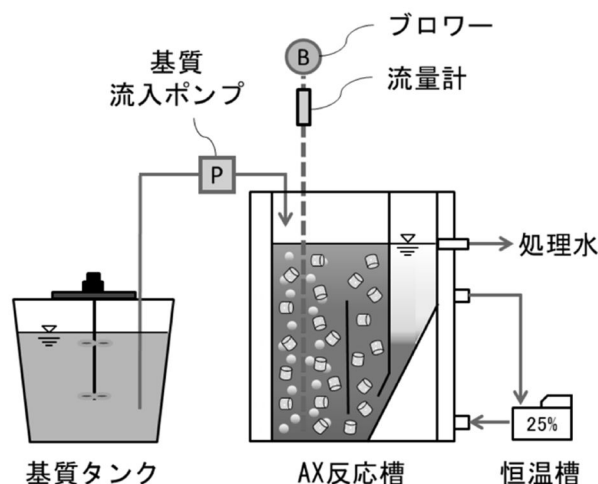


図1 一槽式 Anammox 小型実験装置

本研究に用いた一槽式 Anammox 法小型実験装置を図1に示す。装置構造は微生物反応部と汚泥沈殿部からなる一槽式とし、各容積は 2.0 L および 0.4 L とした。この反応槽に後述の円筒

形担体：30% (600 mL)を投入した。本処理システムに、マイクロチューブポンプを用いて無機合成排水を通水し、エアポンプを用い反応槽底部から曝気を行った。曝気量はパージ流量計を用い、運転段階に応じて0.1-1.2 L/minの範囲で適宜調整を行った。反応槽の外側はウォータージャケット構造とし、恒温槽を用いて反応槽内温度：25 に維持した。pH は特に制御は行わず、全運転期間を通して7.8-8.5で維持していた。

(3) パイロットプラントを用いた AnMBR による下水処理性能の評価

本研究では、自動制御システムを備えた有効容積 5 m³のパイロットスケール AnMBR を用いて、実際生活排水に対する嫌気性処理の長期挙動を検討した。実験装置の概略フローは図2に示す。パイロットスケールの AnMBR の流入水は、S 下水処理場の沈砂池流出水をポンプで原水槽に送られた。原水はドラムスクリーンを通すことで、夾雑物が除去された。汚泥の液面は 1910 mm の高さに維持され、連続攪拌されていた。

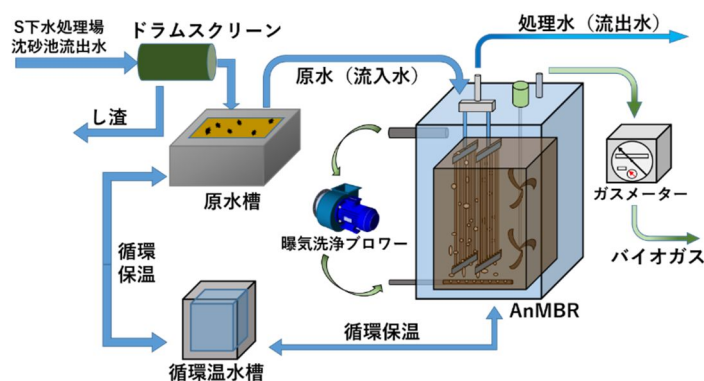


図 2 実証機 AnMBR 概略フロー

(4) パイロットプラントを用いた Anammox 法による下水の窒素処理の性能評価

有効容積 1670L の一槽式アナモックス反応槽のパイロットプラントを設計して下水処理場に設置して AnMBR の後処理として運転した。反応槽内に 10mm の中空式円柱型担体を充填した。実験は、微生物馴致のためのスタートアップと AnMBR 処理水を用いた連続実験に分けて実施した。

4. 研究成果

(1) 小型 AnMBR 装置を用いた下水処理の性能評価

まず膜孔径の影響に関する研究として 2 つの AnMBR を立ち上げて、孔径が 0.4 μm、と 0.05 μm の異なる膜孔径の反応槽の運転において、透過流束 (フラックス)、ろ過抵抗 (Rt) および混合液の粒度分布などが含まれて総合的な比較を行った (図3)。孔径 0.4 μm の膜を備えた AnMBR は、透過流束が 0.274 m/d と高い場合でも、平均 Rt が $1.08 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ であった。しかし、孔径 0.05 μm の膜の AnMBR には流束が 0.148 m/d と低いでも、平均 Rt が $1.51 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ の高い値を示した。したがって膜ろ過能力において孔径が 0.4 μm の膜が過ぎれていたことが分かった。また、本研究には、使用された膜モジュールを膜洗浄実験と分析実験より、膜ファウリング (膜の汚染) に係るメカニズムと汚染物質を解析した。結果として、下水処理に適用された AnMBR は有機物と微生物代謝物が膜ファウリングの主な成分で、無機物はほとんどない。そして、膜洗浄を通して、膜の復元効率が 90.2% での高い値が得られた。

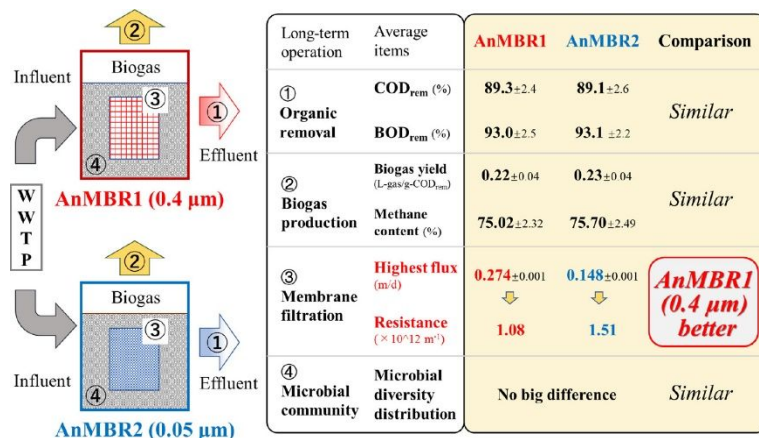


図 3 異なる膜孔径 AnMBR に係るパフォーマンスの比較

(2) 小型 Anammox 装置による下水の窒素処理の性能評価

本実験において円筒形担体投入型一槽式 Anammox プロセスを用い低濃度アンモニア無機合成排水の処理性能評価を行ったところ、以下の知見を得た。中濃度アンモニア無機合成排水を用い HRT6 時間でスタートアップを行うことで、平均 T-IN 除去率：75.7 ± 7.2% を得、運転 41 日間での迅速な立ち上げを行うことができた。低濃度アンモニア無機合成排水（流入 NH₄⁺-N：50 mg/L）の処理において、HRT2-3 時間では DO0.2mg/L 以下に維持することで平均 T-IN 除去率 74.5 ± 4.3% を得た。活性試験の結果より、担体付着汚泥に Anammox 細菌と AOB の活性が確認され、浮遊汚泥では AOB の活性が確認された。FISH 解析の結果より、担体内側に多量の付着汚泥が確認され、Anammox 細菌の優占が確認された。また表層に AOB が付着することで層状の構造を形成しており、この現象により Anammox 細菌が DO の阻害影響から保護され担体付着汚泥において優占したと示唆された。菌叢解析の結果より、アナモックス細菌である“*Ca. Kuenenia stuttgartiensis*”が最も相対存在割合が高く、次いで AOB である *Nitrosomonas* の存在割合が高かった。本装置において Anammox 細菌と AOB の共生関係が形成されていたと示唆された。

(3) パイロットプラントを用いた AnMBR による下水処理性能の評価

AnMBR に関するパイロットプラント実験では、スタートアップが成功した後に、まず温度 25 で HRT を 48 時間から 24, 12, 8, 6 時間まで段階的に短縮して、処理性能に及ぼす HRT の影響を把握した。その後、HRT を再度 8 時間で長く運転して検証した。各 HRT 条件において安定したバイオガス発生量とメタンガス含有率が AnMBR から得られた。バイオガス発生量は、HRT 12、8、6h 条件の各安定期間中に上昇した。バイオガス中のメタンガス含有率は常に 75% 以上であり、最大 81% であった。実証実験に実現した AnMBR による生活排水の処理結果は図 5 に示す。一槽式浸漬型パイロットスケール嫌気性 MBR による低温の実生活排水に対する嫌気性処理に成功し、以下の重要な結論と AnMBR の応用に向けた重要な知見を得た。

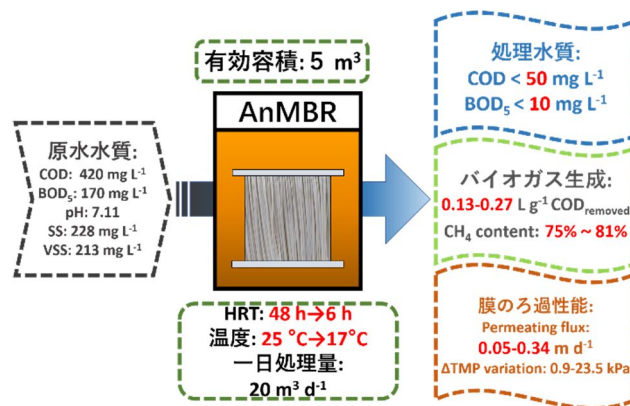


図 4 パイロットスケール AnMBR による生活排水処理結果まとめ

ドラムスクリーンによる原水中の夾雑物に対する効果的除去を前処理として、有効容積 5 m³ のパイロット規模の AnMBR を用いて実下水を 25 °C で HRT 6h の条件で効果的な処理に成功した。COD 除去効率は 90% 以上、BOD₅ 除去は 95% 以上であった。

流入原水からのバイオガス発生率は約 0.11 L/L 原水であり、0.21-0.26 L/g 除去 COD であった。メタンガスが約 75-81% であり、二酸化炭素ガスと窒素ガスはそれぞれ 5-9%、12-17% であった。優れた創エネルギー信頼性と実現可能性を示した。

流入 SS は AnMB で完全には分解されず、SS の一部は直接 MLSS に転化されたため、AnMB の汚泥増殖率は 0.19-0.26g MLSS/g 除去 COD とわずかに増加させた。しかし、流入 SS の 34 - 43% しか MLSS に転化されないため、汚泥収率は活性汚泥法の 1/2-1/3 になる。

流入 COD の 60-64% がメタンに転化され、そのうちの 20-26% が MLSS に転化され、流入窒素の 10-16% が MLSS に転化され、残留の窒素はアンモニア-N になるという収支バランスが、AnMBR の結果に基づいて正確に計算できた。

パイロットスケール AnMBR は、24h、12h、8h の HRT において、フラックスは 0.06 - 0.29 m/d であり、TMP の変動は 0.9 - 12.7 kPa で安定した膜ろ過性能を実現した。しかし、6h の HRT では TMP が急激に上昇し、高濃度の MLSS による深刻な膜ファウリングが発生し、最大フラックスは 0.34 m/d であり、最大 ΔTMP は 23.5 kPa であった。

(4) パイロットプラントを用いた Anammox 法による下水の窒素処理の性能評価

令和 1 年度では、新たな一槽式 Anammox 反応槽を設計し、1670L のパイロット装置の稼働を

開始した。最初には、FA・FNA 阻害により活性汚泥からアンモニア酸化菌(AOB)の馴養と亜硝酸酸化菌(NOB)の抑制を成功し、アンモニア酸化菌による部分的硝化を実現した。そして、Anammox 細菌の種汚泥を投入して、人工基質で必要な負荷(0.5 g-N/L/d)を確保しながら、Anammox 細菌による窒素除去速度の向上を確認した。最後に、AnMBR 処理水(アンモニア窒素濃度 38 ± 6 mg N/L)で実験を行った結果、窒素負荷 0.20 g N/L/d、水力滞留時間 4h の条件下で、平均窒素除去率が 74.3% 達成し、下水の窒素処理のための一槽式 PNA パイロットプラントのスタートアップが完了した。

令和 2 年度では、前年度の経験によって、最適な制御パラメータで一槽式 PNA パイロットプラントを稼働させて、機能性担体に厚み 1~2mm のバイオフィームが成功に形成した。16S rRNA 菌叢解析によって、アンモニア酸化細菌(AOB)が主に浮遊汚泥に存在し、担体に形成したバイオフィームにはアンモニア酸化細菌(AOB)と Anammox 細菌が含まれていることが明らかにした。このように、機能性担体を投入することで、アンモニア酸化細菌(AOB)と Anammox 細菌を棲み分け、バイオフィームの形で共生系を形成させた(図 5)。このような担体型一槽式 PNA パイロットプラントを用いて、異なる濃度の窒素排水を処理した結果、200~5000mg N/L の濃度範囲の窒素排水に対して、80%以上の窒素除去率を得ることができた。続いて、パイロットプラントの温度を段階的に変更することで季節変動に応じたシステム性能を実証し、15~25℃で安定した窒素処理性能を維持できた。また、温度変化によるアンモニア酸化細菌と Anammox 細菌に及ぼす影響を解明した上で、浮遊汚泥およびバイオフィームでの微生物群集の間の複雑な相互作用により、異なる温度での効率な窒素除去性能が保証されることを明らかにした。

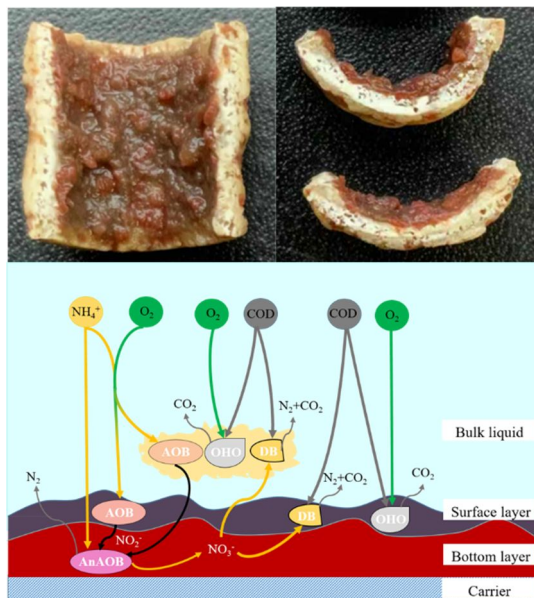


図 5 バイオフィームの様子(上)および主要な微生物の相互作用(下)

(5) 新しいシステムによる下水処理の低炭素化の評価

AnMBR-Anammox システムのエネルギー効率と炭素排出に関するデータを正確に把握するために、長期安定運転データを基礎として 10000 m³/日処理規模に拡大して試算したことによって評価を行った。システム評価により、汚泥処理含めて、AnMBR-Anammox のエネルギー需要量は 0.136 kWh/m³、CO₂ 排出量は 0.098 kg/m³であった。システムでは有機物除去と窒素除去能力があるため、同等の機能を持つ循環式硝化脱窒法+凝集沈殿池システムと比較して(エネルギー消費量は 0.413 kWh/m³、CO₂ 排出量は 0.228 kg/m³) AnMBR-Anammox x システムは 67%のエネルギー消費量削減ができ、57%の CO₂ 削減量ができる。

以上の結果により、AnMBR-Anammox システムを生活排水処理に応用することで、良好な処理水質を得ることができるだけでなく、効果的な省エネルギー、創エネルギー及び炭素排出の削減ができることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 31件／うち国際共著 18件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jiayuan Ji, Jialing Ni, Akito Ohtsu, Naoko Isozumi, Yisong Hu, Runda Du, Yujie Chen, Yu Qin, Kengo Kubota, Yu-You Li	4. 巻 336
2. 論文標題 Important effects of temperature on treating real municipal wastewater by a submerged anaerobic membrane bioreactor: Removal efficiency, biogas, and microbial community	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 125306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2021.125306	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 Zhe Kong, Lu Li, Jiang Wu, Tianjie Wang, Chao Rong, Zibin Luo, Yang Pan, Dapeng Li, Yong Li, Yong Huang, Yu-You Li.	4. 巻 339
2. 論文標題 Evaluation of bio-energy recovery from the anaerobic treatment of municipal wastewater by a pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) at ambient temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 125551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2021.125551	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 Chao Rong, ZibinLuo, Tianjie Wang, Yan Guo, Zhe Kong, Jiang Wu, JiayuanJi, Yu Qin, Taira Hanaoka, ShinichiSakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Yu-YouLi.	4. 巻 341
2. 論文標題 Chemical oxygen demand and nitrogen transformation in a large pilot-scale plant with a combined submerged anaerobic membrane bioreactor and one-stage partial nitritation-anammox for treating mainstream wastewater at 25 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 125840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2021.125840	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 Yan Guo, Chenglei Xie, Yujie Chen, Kampachiro Urasaki, Yu Qin, Kengo Kubota, Yu-You Li.	4. 巻 200
2. 論文標題 Achieving superior nitrogen removal performance in low-strength ammonium wastewater treatment by cultivating concentrated, highly dispersive, and easily settleable granule sludge in a one-stage partial nitritation/anammox-HAP reactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 117217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2021.117217.	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 Jiang Wu, Zhe Kong, Zibin Luo, Yu Qin, Chao Rong, Tianjie Wang, Taira Hanaoka, Shinichi Sakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Kai-Qin Xu, Takuro Kobayashi, Kengo Kubota, Yu-You Li	4. 巻 207
2. 論文標題 A successful start-up of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) coupled mainstream partial nitrification-anammox (PN/A) system: A pilot-scale study on in-situ NOB elimination, AnAOB growth kinetics, and mainstream treatment performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 117783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2021.117783	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 Yi Xue, Haiyuan Ma, Yisong Hu, Zhe Kong, Yu-You Li	4. 巻 210
2. 論文標題 Microstructure and granulation cycle mechanisms of anammox-HAP coupled granule in the anammox EGSB reactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 117968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2021.117968	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 Yunzhi Qian, Yan Guo, Junhao Shen, Yu Qin, Yu-You Li	4. 巻 217
2. 論文標題 Biofilm growth characterization and treatment performance in a single stage partial nitrification/anammox process with a biofilm carrier.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 118437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2022.118437	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 Zhe Kong, Lu Li, Jiang Wu, Chao Rong, Tianjie Wang, Rong Chen, DaisukeSano, Yu-You L	4. 巻 813
2. 論文標題 Unveiling the characterization and development of prokaryotic community during the start-up and long-term operation of a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor for the treatment of real municipal wastewater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 152643
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2021.152643	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 Chao Rong, Tianjie Wang, Zibin Luo, Yan Guo, Zhe Kong, Jiang Wu, Yu Qin, Taira Hanaoka, Shinichi Sakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Yu-You Li	4. 巻 349
2. 論文標題 Seasonal temperatures impact on the mass flows in the innovative integrated process of anaerobic membrane bioreactor and one-stage partial nitrification-anammox for the treatment of municipal wastewater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ioresource Technology	6. 最初と最後の頁 126864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2022.126864	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 Jiayuan Ji, Jialing Ni, Akito Ohtsu, Naoko Isozumi, Yisong Hu, Runda Du, Yujie Chen, Yu Qin, Kengo Kubota, Yu-You Li	4. 巻 336
2. 論文標題 Important effects of temperature on treating real municipal wastewater by a submerged anaerobic membrane bioreactor: Removal efficiency, biogas, and microbial community	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 125306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2021.125306	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 Zhe Kong, Lu Li, Jiang Wu, Tianjie Wang, Chao Rong, Zibin Luo, Yang Pan, Dapeng Li, Yong Li, Yong Huang, Yu-You L	4. 巻 339
2. 論文標題 Evaluation of bio-energy recovery from the anaerobic treatment of municipal wastewater by a pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) at ambient temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 125551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2021.125551	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 Chao Rong, ZibinLuo, Tianjie Wang, Yan Guo, Zhe Kong, Jiang Wu, JiayuanJi, Yu Qin, Taira Hanaoka, ShinichiSakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Yu-YouLi	4. 巻 341
2. 論文標題 Chemical oxygen demand and nitrogen transformation in a large pilot-scale plant with a combined submerged anaerobic membrane bioreactor and one-stage partial nitrification-anammox for treating mainstream wastewater at 25 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 125840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2021.125840	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 Yan Guo, Chenglei Xie, Yujie Chen, Kampachiro Urasaki, Yu Qin, Kengo Kubota, Yu-You Li	4. 巻 200
2. 論文標題 Achieving superior nitrogen removal performance in low-strength ammonium wastewater treatment by cultivating concentrated, highly dispersive, and easily settleable granule sludge in a one-stage partial nitrification/anammox-HAP reactor.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 117217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2021.117217	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 Jiang Wu, Zhe Kong, Zibin Luo, Yu Qin, Chao Rong, Tianjie Wang, Taira Hanaoka, Shinichi Sakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Kai-Qin Xu, Takuro Kobayashi, Kengo Kubota, Yu-You Li	4. 巻 207
2. 論文標題 A successful start-up of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) coupled mainstream partial nitrification-anammox (PN/A) system: A pilot-scale study on in-situ NOB elimination, AnAOB growth kinetics, and mainstream treatment performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 117783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2021.117783	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 Yi Xue, Haiyuan Ma, Yisong Hu, Zhe Kong, Yu-You Li	4. 巻 210
2. 論文標題 Microstructure and granulation cycle mechanisms of anammox-HAP coupled granule in the anammox EGSB reactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 117968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2021.117968	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 Yunzhi Qian, Yan Guo, Junhao Shen, Yu Qin, Yu-You Li.	4. 巻 217
2. 論文標題 Biofilm growth characterization and treatment performance in a single stage partial nitrification/anammox process with a biofilm carrier	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 118437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2022.118437	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 Zhe Kong, Lu Li, Jiang Wu, Chao Rong, Tianjie Wang, Rong Chen, DaisukeSano, Yu-You Li	4. 巻 813
2. 論文標題 Unveiling the characterization and development of prokaryotic community during the start-up and long-term operation of a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor for the treatment of real municipal wastewater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 152643
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2021.152643	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 Chao Rong, Tianjie Wang, Zibin Luo, Yan Guo, Zhe Kong, Jiang Wu, Yu Qin, Taira Hanaoka, Shinichi Sakemmi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Yu-You Li	4. 巻 349
2. 論文標題 Seasonal temperatures impact on the mass flows in the innovative integrated process of anaerobic membrane bioreactor and one-stage partial nitrification-anammox for the treatment of municipal wastewater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 126864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2022.126864	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 新田 しおり, 泉田 理玖, 杜 潤達, 胡 以松, 李 玉友	4. 巻 45
2. 論文標題 HAP-PNA グラニユール方式一槽型アナモックスプロセスによる嫌気性 MBR 処理後の実下水の窒素除去	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 水環境学会誌	6. 最初と最後の頁 1-9
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 -

1. 著者名 Jiayuan Ji, Satoshi Sakuma, Jialing Ni, Yujie Chen, Yisong Hu, Akito Ohtsu, Rong Chen, Hui Cheng, Yu Qin, Toshimasa Hojo, Kengo Kubota, Yu-You Li	4. 巻 745
2. 論文標題 Application of two anaerobic membrane bioreactors with different pore size membranes for municipal wastewater treatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 140903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.140903	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 Yan Guo, Takumi Sugano, Ying Song, Chenglei Xie, Yujie Chen, Yi Xue, Yu-You Li	4. 巻 311
2. 論文標題 The performance of freshwater one-stage partial nitrification/anammox process with the increase of salinity up to 3.0%	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 123489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2020.123489	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 Yan Guo, Li Yu-You	4. 巻 187
2. 論文標題 Hydroxyapatite crystallization-based phosphorus recovery coupling with the nitrogen removal through partial nitrification/anammox in a single reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water Research	6. 最初と最後の頁 116444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.watres.2020.116444	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 Zhe Kong, Jiang Wu, Chao Rong, Tianjie Wang, Lu Li, Zibin Luo, Jiayuan Jia, Taira Hanaoka, Shinichi Sakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Yu Qin, Yu-You Li	4. 巻 319
2. 論文標題 Large pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor for the treatment of municipal wastewater and biogas production at 25 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 124123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2020.124123	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 Zhe Kong, Jiang Wu, Chao Rong, Tianjie Wang, Lu Li, Zibin Luo, Jiayuan Jia, Taira Hanaoka, Shinichi Sakemi, Masami Ito, Shigeki Kobayashi, Masumi Kobayashi, Yu Qin, Yu-You Li	4. 巻 759
2. 論文標題 Sludge yield and degradation of suspended solids by a large pilot-scale anaerobic membrane bioreactor for the treatment of real municipal wastewater at 25 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 143526
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.143526	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 Jiayuan Ji, Yujie Chen, Yisong Hu, Akito Ohtsu, Jialing Ni, Yemei Li, Satoshi Sakuma, Toshimasa Hojo, Rong Chen, Yu-You Li	4. 巻 775
2. 論文標題 One-year operation of a 20-L submerged anaerobic membrane bioreactor for real domestic wastewater treatment at room temperature: Pursuing the optimal HRT and sustainable flux	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 145799
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2021.145799	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 五十榎直子、紀 佳淵、李玉友	4. 巻 76
2. 論文標題 嫌気性 MBR を用いた実下水のメタン発酵処理に及ぼす温度の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 _173- _179
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 -

1. 著者名 Guangyin Zhen, Yang Pan, Xueqin Lu, Yu-You Li, Zhongyi Zhang, Chengxin Niu, Gopalakrishnan Kumar, Takuro Kobayashi, Youcai Zhao, Kaiqin Xu	4. 巻 115
2. 論文標題 Anaerobic membrane bioreactor towards biowaste biorefinery and chemical energy harvest: Recent progress, membrane fouling and future perspectives	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Renewable and Sustainable Energy Reviews	6. 最初と最後の頁 109392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rser.2019.109392	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 Yan Guo, Yujie Chen, Elizabeth Webeck, Yu-You Li	4. 巻 299
2. 論文標題 Towards more efficient nitrogen removal and phosphorus recovery from digestion effluent: Latest developments in the anammox-based process from the application perspective	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 122560
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2019.122560	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 佐久間智士、陳 栄、北條俊昌、李玉友	4. 巻 61
2. 論文標題 低濃度アンモニア排水処理における円筒形担体投入型一槽式アナモックスプロセスの性能評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 用水と廃水	6. 最初と最後の頁 586-595
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 -

1. 著者名 大津秋人、紀 佳淵、北條俊昌、李玉友	4. 巻 75
2. 論文標題 嫌気性 MBR を用いた実下水処理の性能評価及びHRTの影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 _351- _357
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 -

1. 著者名 陳玉潔、郭延、李玉友	4. 巻 91
2. 論文標題 アナモックスプロセスの発展とトレンド	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本エネルギー学会機関誌えねるみくす	6. 最初と最後の頁 34-41
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16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Jiayuan Ji, Runda Du, Yujie Chen, Yu-You Li
2. 発表標題 Performance of an AnMBR treating real sewage at low temperature
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Water Environment Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tianjie Wang, Zhe Kong, Jiang Wu, Yu Qin, Yu-You Li
2. 発表標題 Efficient treatment of municipal wastewater and biogas production by a pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Water Environment Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zibin Luo, Jiang Wu, Yu-You Li
2. 発表標題 Startup of a pilot-scale anammox reactor for municipal wastewater treatment and biofilm formation
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Water Environment Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chao Rong, Tianjie Wang, Zhe Kong, Yu-You Li
2. 発表標題 Development of an energy saving type municipal wastewater treatment system by combining AnMBR and Anammoc processes: pilot-scale plant study and system evaluation
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Water Environment Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田しおり, 泉田理玖, 杜 潤達, 李 玉友
2. 発表標題 グラニュール方式一槽型アナモックスプロセスによる下水嫌気性 MBR 処理水の安定的窒素除去
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Ji, S. Sakuma, A. Ohtsu, Y. Chen, T. Hojo, Y.Y Li
2. 発表標題 Performance of a mini pilot plant of AnMBR treating real municipal sewage
3. 学会等名 The 16th IWA World Conference on Anaerobic Digestion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 (Yan Guo, Jiechen Chen, Yu-You Li
2. 発表標題 High performance of one-stage anammox-HAP process in treating low concentration wastewater at room temperature
3. 学会等名 4th International Anammox Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Runda Du, Jiayuan Ji, Yujie Chen, Yu-You Li
2. 発表標題 Impact of HRT on the performance of AnMBR treating municipal sewage
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Water Environment Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新田しおり, 陳玉潔, 杜潤達, 李玉友
2. 発表標題 グラニュール方式一槽型アナモックスプロセスによる下水処理の性能評価
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 大津秋人, 紀佳淵, 五十棲直子, 李玉友
2. 発表標題 嫌気性 MBR を用いた実下水処理のシステム性能評価
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 Runda Du, Yisong Hu, Yu-You Li
2. 発表標題 Performance of a Submerged AnMBR treating for real sewage: a view from elemental behavior
3. 学会等名 14th International Conference on Challenges in Environmental Science & Engineering (CESE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chao RONG, Tianjie WANG, Zibin LUO, Yan GUO, Yu-You LI
2. 発表標題 Successful Operation of a Large Pilot-scale Plant Combined of Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor and One-stage Partial Nitritation-anammox for Real Municipal Wastewater Treatment
3. 学会等名 Water and Environment Technology Conference Online 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王 添韻, 宋 超, 羅 子彬, 李 玉友
2. 発表標題 パイロットスケール嫌気性 MBR による下水の メタン発酵処理性能評価
3. 学会等名 第 24 回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羅子彬、宋超、王添韻、郭延、覃宇、李玉友
2. 発表標題 担体添加型一槽式アナモックス法のパイロット試験における流入水窒素濃度の影響
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馮高雪峰、陳玉潔、李玉友
2. 発表標題 HAP グラニュール汚泥型一槽式 Anammox プロセスによる実下水の窒素除去と亜硝酸酸化細菌抑制の研究
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 (宮本愛梨、葉敏、李玉友)
2. 発表標題 嫌気性 MBR とアナモックス法の導入による下水処理の創エネルギー効果の評価
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022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	北條 俊昌 (Hojo Toshimasa) (10708598)	東北工業大学・工学部・准教授 (31303)	

6. 研究組織（つづき）

	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	安井 英斉 (Yasui Hidenari) (70515329)	北九州市立大学・国際環境工学部・教授 (27101)	
研究分担者	増田 周平 (Masuda shouhei) (70552157)	秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (51401)	
研究分担者	矢口 淳一 (Yaguchi Junichi) (80342450)	長野工業高等専門学校・環境都市工学科・嘱託教授 (53601)	
研究分担者	久保田 健吾 (Kubota kengo) (80455807)	東北大学・環境科学研究科・准教授 (11301)	

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