

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本－中国共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「下水再生利用におけるエネルギー回収と健康リスク管理の実現」
2. 研究期間：令和元年4月～令和4年3月
3. 主な参加研究者名：

日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	佐野大輔	教授	東北大学大学院工学研究科	研究総括、ウイルス除去効率評価
主たる共同研究者	李玉友	教授	東北大学大学院工学研究科	嫌気性膜分離処理
研究参加者	朱凡	学生	東北大学大学院環境科学研究科	ウイルス除去効率評価
研究参加者	大村達夫	シニアリサーチフェロー	東北大学未来科学技術共同研究センター	ウイルス除去効率評価
研究参加者	大石若菜	学生	東北大学大学院工学研究科	ウイルス除去効率評価
研究期間中の全参加研究者数			8名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Rong Chen	Professor	Xi'an University of Architecture and Technology	研究総括、嫌気性膜分離処理
主たる共同研究者	Qian Li	Associate Professor	Xi'an University of Architecture and Technology	ウイルス除去効率評価
主たる共同研究者	Yanlong Zhang	Associate Professor	Xiamen University	嫌気性膜分離処理
研究期間中の全参加研究者数			5名	

4. 国際共同研究の概要

本研究は、下水再生におけるエネルギー回収と健康リスク管理を同時に実現することを志向した嫌気性膜分離法 (anaerobic membrane reactor : AnMBR) の実用化に資する成果を得ることを目的としたものである。日中双方で実下水を

処理する AnMBR のパイロットプラントを稼働させ、エネルギー回収効率と水質変換効率の向上のための運転条件最適化に取り組んだ。具体的には、安定した嫌気性処理条件（メタンガス発生）下において、未処理下水水質・処理水水質（pH、水温、アルカリ度、窒素、BOD、COD）、メタンガス発生量および運転条件（水理的滞留時間、水温、膜間差圧）を得た。さらに、定量ろ過条件下で膜間差圧が変化する際のウイルス除去効率を連続的に測定し、同時に未処理下水水質・処理水水質（pH、水温、アルカリ度、窒素、BOD、COD）及びメタンガス発生量を測定した。最終的に、全研究期間を通じて得られたデータを用い、AnMBR によるウイルス除去メカニズムの解明、および除去効率予測モデルの構築を行った。本研究で日本と中国が研究交流を通じて相互的に課題に取り組むことで、下水再生における AnMBR の適用に向けた問題点が整理された。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

パイロットスケール AnMBR を用いた連続実験を行い、実下水（生活排水）を処理対象としたメタン発酵性能、ウイルス除去効率評価、及びウイルス除去効率予測モデル構築を行った。25℃で HRT を 48h から 6h に短縮して長期連続実験を行った結果、COD と BOD₅ 除去率は共に 90%を達成した。また、メタン発酵によるバイオガス発生量は 0.1 L/L であり、メタン含有率は 75-80%であった。ウイルス除去に関しては、膜ファウリングがウイルス除去効率に大きく影響すること、及び機械学習モデルの適用が予測モデル構築に有効であることが明らかとなった。

5-2 国際共同研究による相乗効果

本プロジェクト開始後、日本および西安で 1 回ずつの対面での研究打ち合わせを行い、共同研究の目標と進め方について共有した。そこでの合意に基づいて、2つのワークパッケージに関しそれぞれ総説論文を共同で執筆したが、その過程で、研究課題に関する問題意識と取るべき研究アプローチが十分に共有できた。その後、新型コロナウイルス感染症の拡大により対面での打合せはできない状況となってしまったが、数ヶ月に 1 回はオンラインでの打ち合わせとメールでの情報共有により、遅滞なく研究を進めることが可能であった。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本プロジェクトにより AnMBR の稼働、及び AnMBR によるウイルス除去効率評価に関する経験を積んだ若手研究者を多く輩出することができた。本国際共同研究で得られた成果は、産官学が参画するシンポジウムや、国際イベントにおける研究発表・展示会を通じて、国際水ビジネスに携わる企業に向けた宣伝を積極的に行っていく。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
Japan – China Joint Research Program
Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Energy recovery and pathogen risk management in wastewater reclamation by anaerobic membrane bioreactors」
2. Research period : April 2019 ~ March 2022
3. Main participants :

Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Daisuke Sano	Professor	Tohoku University	Project management, Virus removal modeling
Co-PI	Yu-You Li	Professor	Tohoku University	AnMBR operation
Collaborator	Yifan Zhu	Student	Tohoku University	Virus removal modeling
Collaborator	Tatsuo Omura	Senior Research Fellow	Tohoku University	Virus removal modeling
Collaborator	Wakana Oishi	Student	Tohoku University	Virus removal modeling
Total number of participants throughout the research period: 8				

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Rong Chen	Professor	Xi'an University of Architecture and Technology	Project management. AnMBR operation
Co-PI	Qian Li	Associate Professor	Xi'an University of Architecture and Technology	Virus removal modeling
Co-PI	Yanlong Zhang	Associate Professor	Xiamen University	AnMBR operation
Total number of participants throughout the research period: 5				

4. Summary of the international joint research

The purpose of this study was to put the anaerobic membrane reactor (AnMBR) into practical use for domestic wastewater treatment, in which both energy recovery and health risk management in wastewater reclamation and reuse were realized. AnMBR pilot plants, which treated actual domestic wastewater in both Japan and China, were put into operation, and operating conditions were optimized to improve energy recovery efficiency and water quality conversion efficiency. Specifically, under stable anaerobic treatment conditions, untreated wastewater quality and treated wastewater quality (pH, water temperature, alkalinity, nitrogen, BOD, COD), methane gas generation amount and the operating conditions (hydraulic retention time, water temperature, trans-membrane pressure) were obtained. Furthermore, the virus removal efficiency was continuously measured, and its correlation with the quality of untreated and treated wastewater and the amount of methane gas generated was investigated. Finally, we elucidated the virus removal mechanism by AnMBR and constructed a removal efficiency prediction model. Through mutual efforts between Japan and China in this international collaborative study, the applicability of AnMBR in sewage reclamation was confirmed, and it became possible to expand it globally as a technology originating in East Asia.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

A series of experiments using the pilot-scale AnMBR were conducted to evaluate the methane fermentation performance and virus removal efficiency and develop a virus removal efficiency prediction model. As a result of long-term continuous experiments with the HRT shortened from 48h to 6h at 25 °C, both COD and BOD₅ removal rates reached 90%. The amount of biogas generated by methane fermentation was 0.1 L / L, and the methane content was 75-80%. Regarding virus removal, it was clarified that membrane fouling greatly affects virus removal efficiency, and that the application of machine learning models was effective in constructing predictive models.

5-2 Synergistic effects of the joint research

Just after the launch of this project, we held face-to-face research meetings in both Japan and China to share the goals and procedures of joint research. Based on the agreement there, we co-authored review articles on each of the two work packages, and in the process, we were able to fully share the important research issues and the research approach to be taken. After that, due to the spread of the new coronavirus infection, it became impossible to have face-to-face meetings,

but once every few months, online meetings and information sharing by e-mail made it possible to proceed with research without delay.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

Through this project, we were able to produce many young researchers who have experience in the operation of AnMBR and the evaluation of virus removal efficiency by AnMBR. The results obtained from this international joint research will be actively promoted to companies involved in the international water business through symposiums in which industry, government and academia participate, and research presentations and exhibitions at international events.

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

*原著論文（相手側研究チームとの共著論文）発表件数：計 16 件

・査読有り：発表件数：計 16 件

1. Z. Lei, S. Yang, X. Li, W. Wen, X. Huang, Y. Yang, X. Wang, Y.-Y. Li, D. Sano and R. Chen, "Revisiting the effects of powdered activated carbon on membrane fouling mitigation in an anaerobic membrane bioreactor by evaluating long-term impacts on the surface layer", *Water Res.*, **2019**, 167, 115137 DOI: 10.1016/j.watres.2019.115137
2. Z. Ji, X. C. Wang, L. Xu, C. Zhang, R. Chen, A. T. Rachmadi, M. Amarasiri, S. Okabe, N. Funamizu and D. Sano, "Fecal source tracking in a wastewater treatment and reclamation system using membrane bioreactor evidenced by molecular epidemiology of multiple waterborne gastroenteritis viruses". *Pathogens*, **2019**, 8(4), 170 DOI: 10.3390/pathogens8040170
3. Q. Li, X. Gao, Y. Liu, G. Wang, Y.-Y. Li, D. Sano, X. Wang and R. Chen, "Biochar and GAC intensify anaerobic phenol degradation via distinctive adsorption and conductive properties", *J. Hazard. Mater.*, **2021**, 405, 124183 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124183
4. Y. Zhu, R. Chen, Y.-Y. Li and D. Sano, "Virus removal by membrane bioreactors: A review of mechanism investigation and modeling efforts", *Water Res.*, **2021**, 188, 116522 DOI: 10.1016/j.watres.2020.116522
5. H. Cheng, Y. Li, L. Li, R. Chen and Y.-Y. Li, "Long-term operation performance and fouling behavior of a high-solid anaerobic membrane bioreactor in treating food waste", *Chem. Eng. J.*, **2020**, 394, 124918 DOI: 10.1016/j.cej.2020.124918
6. J. Wang, Z. Lei, L. Wang, S. Yang, Y. Zhao, Y.-Y. Li and R. Chen, "Insight into using up-flow anaerobic sludge blanket-anammox to remove nitrogen from an anaerobic membrane reactor during mainstream wastewater treatment", *Bioresour. Technol.*, **2020**, 314, 123710 DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123710
7. Z. Lei, S. Yang, L. Wang, X. Huang, X. C. Wang, Y.-Y. Li, Q. Li, Y. Zhao and R. Chen, "Achieving successive methanation and low-carbon denitrogenation by a novel three-stage process for energy-efficient wastewater treatment", *J. Clean. Prod.*, **2020**, 276, 124245 DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124245
8. S. Li, L. Zhen, D. Mawuli, Y.-Y. Li, L. Qian and R. Chen, "Application of the anammox-based process for nitrogen removal from anaerobic digestion effluent: A review of treatment performance, biochemical reactions, and impact factors", *J. Water Process Eng.*, **2020**, 38, 101595, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145124
9. Y. Zhu, W. Oishi, C. Maruo, M. Saito, R. Chen, M. Kitajima and D. Sano, "Early warning of COVID-19 via wastewater-based epidemiology: potential and bottlenecks", *Sci. Total Environ.*, **2021**, 767, 145124 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145124
10. J. Zhang, B. Wu, J. Zhang, X. Zhai, Z. Liu, Q. Yang, H. Liu, Z. Hou, D. Sano and R. Chen, "Virus removal during sewage treatment by anaerobic membrane bioreactor (AnMBR): The role of membrane fouling", *Water Res.*, **2022**, 211, 118005 DOI: 10.1016/j.watres.2022.118055

11. Z. Kong, L. Li, J. Wu, C. Rong, T. Wang, R. Chen, D. Sano, and Y.-Y. Li, "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", *Sci. Total Environ.*, **2022**, 813, 152643 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152643
12. Z. Lei, J. Wang, L. Leng, S. Yang, M. Dzakpasu, Q. Li, Y.-Y. Li, X. Wang and R. Chen, "New insight into the membrane fouling of anaerobic membrane bioreactors treating sewage: Physicochemical and biological characterization of cake and gel layers", *J. Membr. Sci.*, **2021**, 632, 119383 DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119383
13. S. Zhang, Z. Lei, M. Dzakpasu, Q. Li, Y.-Y. Li and R. Chen, "Removal of trace organic contaminants in municipal wastewater by anaerobic membrane bioreactor: Efficiencies, fates and impact factors", *J. Water Process Eng.*, **2021**, 40, 101953 DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101953
14. Q. Li, Y. Liu, W. Gao, G. Wang, M. Dzakpasu, Y.-Y. Li and R. Chen, "New insights into the mechanisms underlying biochar-assisted sustained high-efficient co-digestion: Reducing thermodynamic constraints and enhancing extracellular electron transfer flux", *Sci. Total Environ.*, **2022**, 811, 151416, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151416
15. B. Wu, H. Liu, Z. Liu, J. Zhang, X. Zhai, Y. Zhu, D. Sano, X. Wang and R. Chen, "Interface behavior and removal mechanisms of human pathogenic viruses in anaerobic membrane bioreactor (AnMBR)", *Water Res.*, **2022**, 219, 118506 DOI: 10.1016/j.watres.2022.118506
16. Y. Hu, X. Cai, Y. Xue, R. Du, J. Ji, R. Chen, D. Sano and Y.-Y. Li, "Recent development of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment and bioenergy recovery: Focusing on novel configurations and energy balance analysis", *J. Clean. Prod.*, **2022**, 356, 131856 DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131856

・査読無し：発表件数：計 0 件

該当なし

*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文)：発表件数：計 1 件

・査読有り：発表件数：計 1 件

1. Y. Hu, H. Cheng, J. Ji and Y.-Y. Li, "A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment with a focus on multicomponent biogas and membrane fouling control", *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, **2020**, 6, 2641-2663.

・査読無し：発表件数：計 0 件

該当なし

*その他の著作物 (相手側研究チームとの共著総説、書籍など)：発表件数：計 0 件

該当なし

*その他の著作物(相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など): 発表件数: 計 0 件
該当なし

2. 学会発表

*口頭発表(相手側研究チームとの連名発表)

発表件数: 計 1 件(うち招待講演: 0 件)

1. Y. Zhu, R. Chen, Y.-Y. Li and D. Sano, "Virus removal by membrane bioreactors: mechanism and modeling efforts", 8th International Symposium on Water Environment Systems, Tohoku University, 2020/11/13

*口頭発表(相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数: 計 0 件(うち招待講演: 0 件)

該当なし

*ポスター発表(相手側研究チームとの連名発表)

発表件数: 計 0 件

該当なし

*ポスター発表(相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数: 計 0 件

該当なし

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. JST-SICORP Kickoff seminar, 主催者: Rong Chen (Xi'an University of Architecture and Technology・教授), Holiday Inn Xi'an Big Goose Pagoda (Wenchang Room), Xi'an, China, 2019年8月12-13日, 参加者数15名
2. JST-SICORP Seminar, 主催者: 佐野大輔(東北大学・教授)、東北大学レアメタル総合棟2F講義室, 仙台, 日本, 2020年1月21日, 参加者数10名
3. JST-SICORP Seminar Online, 主催者: 佐野大輔(東北大学・教授)、オンライン、2020年4月6日、参加者数5名
4. JST-SICORP Seminar Online, 主催者: 佐野大輔(東北大学・教授)、オンライン、2020年9月15日、参加者数5名
5. JST-SICORP Seminar Online, 主催者: 佐野大輔(東北大学・教授)、オンライン、2021年1月19日、参加者数8名
6. The Midterm Symposium on Energy Recovery and Pathogen Risk Management in Wastewater Reclamation by Anaerobic Membrane Bioreactors, 主催者: 佐野大輔(東北大学・教授)、オンライン、2021年7月20日、参加者数20名
7. JST-SICORP Seminar Online, 主催者: Rong Chen (Xi'an University of Architecture and Technology・教授)、オンライン、2022年2月11日、参加

者数 14 名

4. 研究交流の実績 (主要な実績)

- ・ 対面形式のセミナーを計 2 回行った。
- ・ 両国のチームメンバーを交えて **skype** ミーティングを計 5 回開催した。

5. 特許出願

研究期間累積出願件数 : 0 件

6. 受賞・新聞報道等

- ・ 2019 年 10 月 13 日 : Rong Chen, Best Presentation Award of 4th international conference on surface, coatings and nanostructured materials-ASIA
- ・ 2020 年 10 月 30 日 : Yifan Zhu, 東北大学大学院環境科学研究科・第 2 回環境科学討論会 Best Poster Award
- ・ 2020 年 12 月 : Rong Chen, 13th Shaanxi Youth Science and Technology Award
- ・ 2020 年 12 月 : Rong Chen, China Construction Science and Technology Award (1st class)
- ・ 2020 年 11 月 : Qian Li, Committee member of International Water Association China Young Water Professionals (IWA-China YWP)

7. その他

該当なし