

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：31303

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14862

研究課題名（和文）バイオガス発電排熱による下水汚泥の熱処理と合理的な汚泥処理システムの設計

研究課題名（英文）Heat treatment of sewage sludge by waste heat of biogas power generation and design of optimal sludge treatment system

研究代表者

北條 俊昌（Hojo, Toshimasa）

東北工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10708598

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：嫌気性消化におけるバイオガスの増産と下水汚泥処理プロセスにおけるエネルギー自給率をともに最大化させる熱処理条件を明らかにするために、令和2年度には下水汚泥に熱処理を行ったケースについて、令和3年度は消化槽に食品系廃棄物を受け入れるケースについて検討を行った結果、バイオガスコージェネレーションと熱処理技術を融合した低炭素社会に向けた合理的な下水汚泥処理システムの設計に資する研究成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた、100 以下の低温域での下水汚泥や食品廃棄物の熱処理に関する可溶化効果およびバイオガス生成ポテンシャルに関する知見や、様々な条件で熱処理を行った汚泥処理システムにおけるエネルギー効率と環境影響評価のケーススタディの結果は、発電排熱の効率的な活用方法に関する指針として利用可能であり、低炭素社会に向けて下水処理や下水汚泥処理過程で使用されるエネルギーの削減や将来的にエネルギー自給型の下水処理システムを目指す取り組みに貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the heat treatment conditions that maximize both the increase in biogas production in anaerobic digestion and the energy self-sufficiency rate in the sewage sludge treatment process, it was considered that the cases where the sewage sludge or food waste were heat-treated.

The results that contributes to the design of an optimal sewage sludge treatment process that combines biogas cogeneration and heat treatment technology were obtained.

研究分野：土木環境システム

キーワード：下水汚泥 食品廃棄物 熱処理 バイオガス発電排熱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

循環型社会・低炭素社会への取り組みとして下水汚泥の嫌気性消化によるバイオエネルギー生産は注目を浴びている環境配慮型技術であるが、下水汚泥の分解率が低いことに起因して生成するバイオガス量が少ないことが問題点として挙げられる。下水汚泥の熱処理は簡易的な手法で固形物の可溶化の促進が可能であるためバイオガス増産に効果があることが知られており、最適熱処理温度と言われている 170 前後の 130～180 の高温域での研究報告が多いが、下水処理場の現場において 100 以上の高温の熱処理を行うには外部からの大量の熱源を必要とするため現実的ではない。

近年は下水処理場において周辺地域で発生する食品廃棄物などの他のバイオマスを受け入れて下水汚泥と一緒に混合消化を行い消化槽からのバイオガス生産量を増やすとともに、FIT 法を背景として生産したバイオガスを用いてコジェネレーションを行う取り組みが国土交通省により推進されている。このシステムでは約 90 以下の低温域の発電排熱が生じるため、消化槽の加温等に有効利用が可能となることから、エネルギー源を外部に頼ることなく発電排熱による下水汚泥や他の受け入れバイオマスの熱処理を行うことができると考えられる。しかしこれまでに低温域の汚泥の熱処理に関する研究報告は少なく、様々な汚泥や食品系廃棄物への異なる熱処理条件での可溶化効果およびバイオガス生成ポテンシャルに関する体系的な知見の整理が求められている。また様々な熱処理条件を組み込んだ汚泥処理システムにおける環境影響についての網羅的な評価は、今後の低炭素社会に向けた下水処理場における発電排熱の有効利用および廃棄物系バイオマスの利活用に繋がると考えられる。

2. 研究の目的

本研究はバイオガスコジェネレーションと熱処理技術を融合した下水汚泥嫌気性消化技術の高度化を核として、低炭素社会に向けた下水汚泥処理システムの合理化を目指す試みである。下水汚泥の熱処理は嫌気性消化におけるバイオガス増産効果が知られており、本研究では今後の下水処理場に普及が見込まれるバイオガス発電コジェネレーションとその発電排熱が熱処理の供給熱源として利用可能であることに着目し、以下の 3 点の検討を通して嫌気性消化におけるバイオガスの増産と汚泥処理プロセスにおけるエネルギー自給率をともに最大化させる熱処理条件を明らかにすることを目的とする。

- (1) 熱処理による各種下水汚泥および食品系廃棄物の可溶化効果とバイオガス生成ポテンシャルの実験的検討
- (2) バイオガスコジェネレーションを行う下水処理場におけるエネルギー利用効率の現地調査
- (3) 様々な条件で熱処理を行った汚泥処理システムにおけるエネルギー効率および環境影響評価のケーススタディ

3. 研究の方法

- (1) 熱処理による各種下水汚泥および食品系廃棄物の可溶化効果とバイオガス生成ポテンシャルの実験的検討

研究対象とする下水汚泥は(2)の調査対象とする S 浄化センター(標準活性汚泥法)から発生する初沈汚泥、余剰汚泥、消化汚泥と小規模下水処理場を想定した K 浄化センター(オキシデーションディッチ法)で発生する余剰汚泥とし、食品系廃棄物は産業廃棄物収集業者に搬入された混合食品廃棄物を用いた。熱処理条件はバイオガス発電排熱の利用を想定して温度を 50、70、90、時間を 60 分とした。熱処理による可溶化効果は汚泥および食品系廃棄物の COD_{Cr} 等の主要成分の分析を行った。また中温(35)条件の回分実験によりガス生成ポテンシャルを調査した。

- (2) バイオガスコジェネレーションを行う下水処理場におけるエネルギー利用効率の現地調査

S 浄化センターの H26 年度～H30 年度の 5 年分の維持管理年報を用いてバイオガスの利用用途をボイラー用、焼却用、発電用、余剰燃焼に分類し解析を行った。またバイオガス発生量、およびバイオガスによる発電量、下水処理場における電力自給率、発電効率、熱利用効率を算出した。

- (3) 様々な条件で熱処理を行った汚泥処理システムにおけるエネルギー効率および環境影響評価のケーススタディ

本研究で想定した汚泥処理システムを図 1 に示す。S 浄化センターについては発電のみを導入するケース 1、初沈汚泥と余剰汚泥をそれぞれ全量熱処理するケース 2、消化汚泥を発電排熱で可能な量のみ熱処理して再び嫌気性消化を行うケース 3、初沈汚泥又は余剰汚泥の全量を熱処理し余剰の発電排熱によって消化汚泥の熱処理を行うケース 4、K 浄化センターについては発電の

みを導入するケース 5、余剰汚泥の熱処理を行うケース 6 に関して検討を行った。想定する汚泥処理システムのエネルギー利用については、回収する熱エネルギーを発電排熱と熱処理後の下水汚泥が持つ熱エネルギーとし、熱エネルギーの利用先を下水汚泥の熱処理及び消化槽の加温とした。ただし発電排熱によって得られた熱エネルギーのみを熱処理に用いることとした。必要な熱エネルギーを排熱のみで確保できない場合はバイオガスを補填燃料とし、更に不足する場合はバイオマスとして食品系廃棄物を受け入れることとした。発電効率を 30%、排熱回収率を 50%、熱エネルギー利用時のロス率を 20%として計算を行った。

S 浄化センターについて、各環境負荷排出量から LIME2 を利用して環境影響評価を行った。水処理過程の疑似 A0 法と A₂O 法のそれぞれについて、汚泥処理過程として消化のみ、消化+発電、消化+発電+熱処理の計 6 ケースの比較を行った。熱処理の条件としてバイオガス生成ポテンシャルが最も増加する条件である 70 の熱処理を行うケースを考えた。熱処理による影響の変化を詳細に検討するため、発電削減 LCCO₂ の変化による地球温暖化への影響、汚泥処理過程における環境負荷を比較した。汚泥処理過程における環境影響として電力および薬品由来の CO₂、汚泥焼却に伴う N₂O、消化ガス発電による CO₂ の削減量を対象として排出量調査を行った。各環境負荷排出量は平成 26 年度の S 浄化センターの各排出量データを使用した。

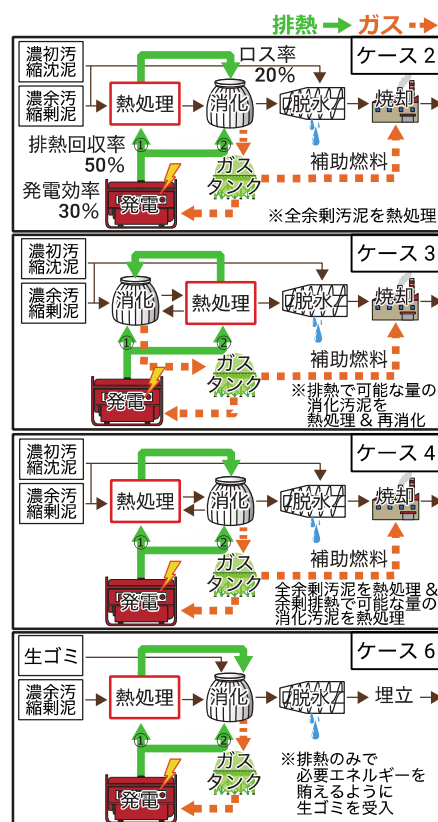


図 1 想定する汚泥処理システム

4. 研究成果

(1) 熱処理による各種下水汚泥および食品系廃棄物の可溶化効果とバイオガス生成ポテンシャルの実験的検討

各種下水汚泥に様々な条件の熱処理を行った結果、下水汚泥の種類により可溶化効果とバイオガス生成ポテンシャルへの影響が異なることが明らかとなった。各汚泥のメタンガス生成ポテンシャルを図 2、各汚泥の性状を表 1 に示す。初沈汚泥は無処理汚泥のガス生成ポテンシャルが 471mL/g-VS と最も高く、熱処理によってガス生成ポテンシャルは約 13%減少した。熱処理を行った汚泥に含まれる炭水化物が無処理汚泥と比較して 13-25%減少していることから、熱処理による汚泥の分解によりガス生成ポテンシャルが減少したと考えられる。熱処理によって標準活性汚泥法の余剰汚泥のガス生成ポテンシャルの増加が見られた。最も顕著な影響が見られた 70 の熱処理の汚泥のガス生成ポテンシャルは無処理の 288mL/g-VS と比較して約 15%増加し 331mL/g-VS であった。70 の熱処理の可溶化率は COD_{Cr} において 18%、炭水化物において 20%と最も高く、タンパク質の可溶化率は 90 の熱処理の汚泥が 38%と最も高かった。以上から 70 の熱処理が最もガス生成ポテンシャルを増加させたと考えられる。消化汚泥についても熱処理を行った汚泥のガス生成ポテンシャルの増加が見られ、最も増加効果があった 90 の熱処理を行った汚泥のガス生成ポテンシャルは無処理の 77mL/g-VS と比較して約 2.2 倍の 170mL/g-VS であった。90 の熱処理の汚泥の可溶化率はいずれの有機成分において最も高く、COD_{Cr} と炭水化物において 17%、タンパク質では 37%であったため、熱処理による有機物の可溶化によってガス生成ポテンシャルが増加することが示された。OD 法の余剰汚泥に関しては無処理の汚泥の 190mL/g-VS と比較して 50 の熱処理によりガス生成ポテンシャルが約 16%減少したが、70 及び 90 の熱処理によってガス生成ポテンシャルが増加した。70 と比較して 90 の熱処理の試料のガス生成ポテンシャルが高く、無処理の汚泥と比較して約 8.4%増加し 206mL/g-VS であった。熱処理による有機物の可溶化率は高温の熱処理の汚泥ほど高い結果となり可溶化率の低い 50 の熱処理では有機物の可溶化効果と比較して熱処理による炭水化物及びタンパク質の分解の影響が大きいため、ガス生成ポテンシャルが減少したと考えられる。

熱処理による食品系廃棄物の可溶化効果とバイオガス生成ポテンシャルの実験的検討を行った結果、熱処理によりバイオガス生成ポテンシャルは減少または無処理に比べてほとんど増加しないという結果が得られ、食品系廃棄物への熱処理はバイオガス増産にほとんど効果がないことが示された。食品系廃棄物 1L あたりからのバイオガス生成量は 120.8L であり、50 の熱処理ではバイオガス生成量は 105.2L と無処理の食品系廃棄物に比べて低くなった。熱処理温度が高くなるにつれてバイオガス生成量は大きくなったが、90 においても無処理とほぼ同じ 121.8L であり、熱処理の効果はないことが明らかになった。

表-2 各試料の性状

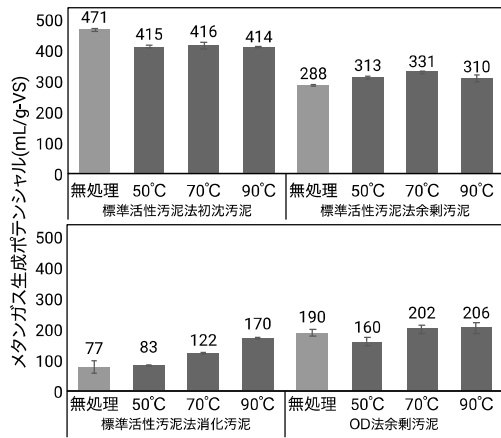


図 2 各試料のメタンガス生成ポテンシャル

	標準活性汚泥法初沈汚泥					
	COD(g/L)		炭水化物(g/L)		たんぱく質(g/L)	
	全-	溶解性-	全-	溶解性-	全-	溶解性-
無処理	45.7	4.7	23.9	0.4	8.2	0.6
50°C	47.6	9.3	20.0	1.3	9.7	1.1
70°C	52.0	6.5	18.3	1.1	9.8	2.4
90°C	53.9	6.2	20.7	0.6	10.6	2.4
	標準活性汚泥法余剰汚泥					
	COD(g/L)		炭水化物(g/L)		たんぱく質(g/L)	
	全-	溶解性-	全-	溶解性-	全-	溶解性-
無処理	72.9	1.4	5.6	0.4	19.2	0.1
50°C	63.4	9.7	6.3	0.9	20.8	3.4
70°C	68.9	14.0	6.5	1.4	25.9	5.8
90°C	53.5	13.9	6.5	1.4	19.9	7.4
	標準活性汚泥法消化汚泥					
	COD(g/L)		炭水化物(g/L)		たんぱく質(g/L)	
	全-	溶解性-	全-	溶解性-	全-	溶解性-
無処理	23.6	2.3	2.6	0.2	5.2	0.1
50°C	22.3	2.0	2.6	0.2	5.6	1.0
70°C	23.5	5.0	2.8	0.4	6.1	1.6
90°C	23.5	5.9	2.6	0.6	4.5	2.0
	OD法余剰汚泥					
	COD(g/L)		炭水化物(g/L)		たんぱく質(g/L)	
	全-	溶解性-	全-	溶解性-	全-	溶解性-
無処理	31.9	1.2	2.5	0.1	4.2	0.2
50°C	48.7	3.1	2.4	0.1	3.6	0.4
70°C	30.2	6.4	2.3	0.3	3.5	0.9
90°C	37.8	7.9	2.5	0.5	3.4	1.7

(2) バイオガスコジェネレーションを行う下水処理場におけるエネルギー利用効率の現地調査
 バイオガスコジェネレーション施設が稼働している S 浄化センターの汚泥処理プロセスにおけるバイオガス生成量、発電量、排熱発生量などについて調査を行った結果、投入汚泥 1m³ 当たりのバイオガス生成量は 19.3m³ と安定しており、生産されたバイオガスの詳細な使用割合および余剰燃焼の割合、電力自給率を把握するとともに、排熱利用効率の試算を行った。

バイオガス発電を開始した事により生産されたバイオガスの約 53.5%が発電に利用され、発電開始前は 41.5%のバイオガスを余剰燃焼して処分していたが発電開始後は 5.7%まで削減されるなど、バイオガスを有効利用していることが確認できた。H30 年度におけるバイオガス発生量は 2,825,686 m³、発電量は 2,793,652kWh であり、発電効率は 16.6%であった。一方で S 浄化センター全体における電力消費量は 20,852,000kWh、汚泥処理過程における電力消費量は 6,443,000kWh であり、S 浄化センター全体および汚泥処理過程における電力自給率はそれぞれ 13.4%と 43.4%であった。S 浄化センターの熱利用効率は 16.8%であり、全国平均の 10.8%より高い値であった。バイオガス発電においてバイオガスの熱量の約 50%が熱利用可能であると言われているが、熱利用がほとんど進んでいないことが明らかとなった。

(3) 様々な条件で熱処理を行った汚泥処理システムにおけるエネルギー効率および環境影響評価のケーススタディ

バイオガス発電排熱を活用した下水汚泥処理システムのエネルギー効率のケーススタディを行った結果、標準活性汚泥法では、余剰汚泥を 70 で、または余剰汚泥と消化汚泥を 50 で熱処理を行うケースで発電量が大きくなり、嫌気性消化におけるバイオガスの増産と汚泥処理プロセスにおけるエネルギー自給率をとともに最大化させる熱処理条件であることが明らかとなった。余剰汚泥を 70 で熱処理した汚泥処理システムについて LIME2 による環境影響評価を行った結果、発電と熱処理の導入により地球温暖化への影響は最大 12.4%低減可能であることが明らかとなった。

標準活性汚泥法における余剰汚泥及び消化汚泥への 50、70、90 の熱処理、OD 法における余剰汚泥への 70、90 の熱処理が嫌気性消化におけるガス生成量の増加に効果的であることが示されたため、それらの熱処理の導入による汚泥処理システムのエネルギー利用への影響について検討した。

標準活性汚泥法における余剰汚泥の熱処理を導入したケースにおける汚泥処理システムの 1 日当たりの熱エネルギー利用及び発電量を図 3 に示す。熱処理を導入した各ケースにおける発電量が発電のみのケースと比較して増加する結果となり、最も発電量が大きかった 70 の熱処理を導入したケースでは 12,400kWh/日と発電のみのケースと比較して約 800kWh/日増加した。90 の熱処理は必要なエネルギー量が大きく排熱のみでは汚泥処理に必要なエネルギーを賄うことができず、不足となる約 300 万 kJ/日をバイオガスの燃料利用で賄う必要があるため汚泥処理システムにおける効率的なエネルギー利用が行えないことが示された。

標準活性汚泥法における消化汚泥の熱処理を導入したケースにおける汚泥処理システムの 1 日当たりの熱エネルギー利用と熱処理汚泥量及び発電量を図 4 に示す。50 の熱処理は最も単位汚泥量当たりの熱処理に必要なエネルギー量が小さいため 50 の熱処理を導入するケースにおける消化汚泥の熱処理量は発生する消化汚泥の約 85%と最も大きくなった。想定するケースでは熱処理を行った消化汚泥の嫌気性消化を行うためバイオガス発生量及び発電量も 50 の熱処理を導入したケースが最も大きく、発電量は約 13,000kWh/日であった。発電排熱の回収量も大きいため 50 の熱処理を導入するケースはコジェネレーションの適用による熱処理のエネルギー源の確保を効率的に行うことが可能であると示唆された。

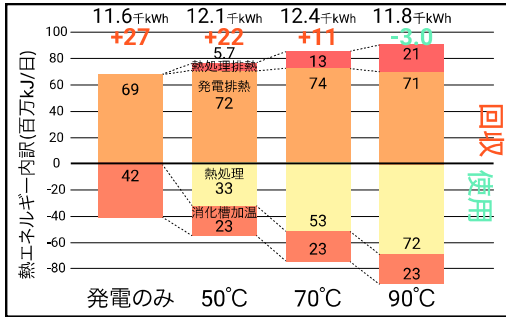


図3 システム内のエネルギー利用 1

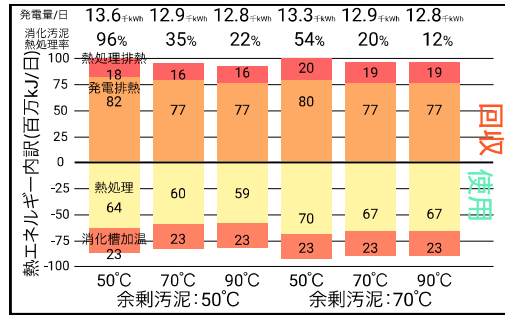


図5 システム内のエネルギー利用 3

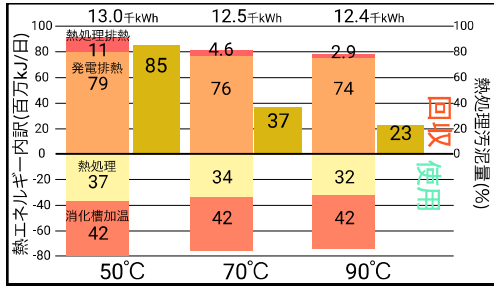


図4 システム内のエネルギー利用 2

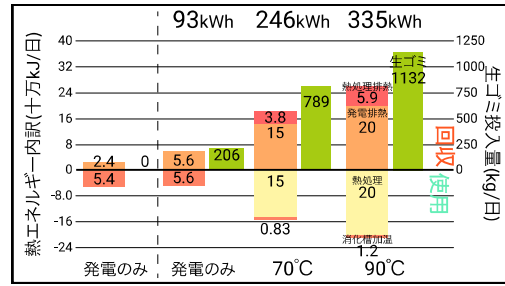


図6 システム内のエネルギー利用 4

標準活性汚泥法における余剰汚泥と消化汚泥の熱処理を導入したケースにおける汚泥処理システムの1日当たりの熱エネルギー利用及び発電量を図5に示す。余剰汚泥を90で熱処理する場合、発電排熱が余剰とならないため消化汚泥の熱処理は行えない。70と比較して50の熱処理を余剰汚泥に行うケースは余剰発電排熱量が大きく、特に消化汚泥に50の熱処理を行うケースが最も消化汚泥の熱処理量が大きく嫌気性消化を再び行う消化汚泥量が多い。そのため余剰汚泥及び消化汚泥に50の熱処理を行うケースが約13,600kWh/日と最も発電量が多いことが示された。

OD法における余剰汚泥の熱処理を導入したケースにおける汚泥処理システムのエネルギー利用と発電量および食品系廃棄物としての生ごみの受け入れ量を図6に示す。標準活性汚泥法の余剰汚泥と比較しOD法の余剰汚泥の生分解性が低く、発電のみを導入するケースでは発電排熱のみで汚泥処理システムに必要な熱エネルギーを賄うことができないため、コージェネレーションによる熱エネルギーの供給のためには生ごみ等のバイオマスの受け入れが必要であることが明らかとなった。

LIME2を用いて環境影響評価を行い地球温暖化への影響を比較し表2に示した。消化のみの場合に比べて消化+発電の場合では7.2%~11.3%、消化+発電+熱処理の場合では7.6%~12.4%、消化+発電の場合に比べて消化+発電+熱処理では、0.5%~1.3%が地球温暖化への影響を低減可能であることが明らかになった。熱処理を導入した汚泥処理過程での環境影響の統合化による結果を図7に示し環境被害金額の比較を行った。消化のみの場合に比べて消化+発電の場合には16.9%~21.2%、消化+発電+熱処理の場合には18.0%~23.3%、消化+発電に対して消化+発電+熱処理の場合には1.4%~2.7%のLCCO₂が発電によって削減可能であることが明らかになった。

表2 地球温暖化への影響

疑似AO法			A ₀ 法		
消化のみ	消化+発電	消化+発電+熱処理	消化のみ	消化+発電	消化+発電+熱処理
0.458 (g-CO ₂ /m ³)	0.425 (g-CO ₂ /m ³)	0.423 (g-CO ₂ /m ³)	0.355 (g-CO ₂ /m ³)	0.315 (g-CO ₂ /m ³)	0.311 (g-CO ₂ /m ³)

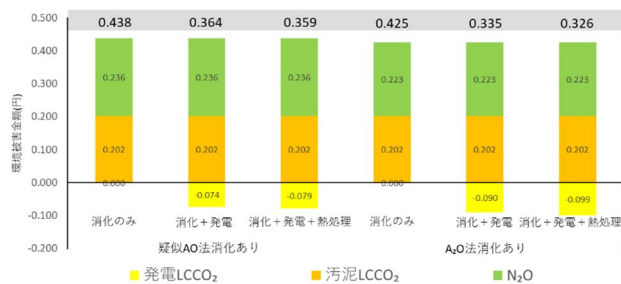


図7 汚泥処理過程に排出される環境負荷の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ji Jiayuan, Sakuma Satoshi, Ni Jialing, Chen Yujie, Hu Yisong, Ohtsu Akito, Chen Rong, Cheng Hui, Qin Yu, Hojo Toshimasa, Kubota Kengo, Li Yu-You	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 ~ 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ji Jiayuan, Chen Yujie, Hu Yisong, Ohtsu Akito, Ni Jialing, Li Yemei, Sakuma Satoshi, Hojo Toshimasa, Chen Rong, Li Yu-You	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 ~ 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ji Jiayuan, Du Runda, Ni Jialing, Chen Yujie, Hu Yisong, Qin Yu, Hojo Toshimasa, Li Yu-You	4. 巻 355
2. 論文標題 Submerged anaerobic membrane bioreactor applied for mainstream municipal wastewater treatment at a low temperature: Sludge yield, energy balance and membrane filtration behaviors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 131831 ~ 131831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2022.131831	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 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村山魁都, 草弾真久, 北條俊昌, 金主鉉, 増田周平
2. 発表標題 下水二次処理の塩素消毒工程におけるN2Oの生成特性評価
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井武文, 北條俊昌, 大友渉平, 柴田悟, 高階史章, 李玉友, 増田周平
2. 発表標題 下水処理場におけるN2O 濃度の変動特性に及ぼす流入負荷および降雨の影響
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 増田周平, 北條俊昌, 大友渉平, 李玉友, 山崎宏史
2. 発表標題 水処理プロセスにおける亜酸化窒素濃度の時間変動 -連続モニタリングの比較-
3. 学会等名 第58回下水道研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川友哉, 長峯丞都, 石黒駿哉, 北條俊昌
2. 発表標題 下水汚泥嫌気性消化により発生したバイオガスの利用状況
3. 学会等名 第13回廃棄物資源循環学会東北支部 & 第9回日本水環境学会東北支部合同研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹野祐太郎, 土生圭也, 小野太雅, 北條俊昌
2. 発表標題 熱処理が及ぼす余剰汚泥の可溶化と嫌気性消化によるバイオガス生成量の関係
3. 学会等名 第13回廃棄物資源循環学会東北支部 & 第9回日本水環境学会東北支部合同研究発表会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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