

養豚廃水からの N, P, K 回収における回分式反応装置の性能評価

土手 裕^{a)}・武藤 大起^{b)}・関戸 知雄^{c)}

Performance Evaluation of Batch Reactor for Nitrogen, Phosphorus and Potassium Recovery from Swine Wastewater

Yutaka DOTE, Daiki MUTO, Tomoo SEKITO

Abstract

Batch recovery experiments were conducted to evaluate the performance of a batch reactor under different mixing intensity and mixing time. Mixing intensity had no effect on physical performance such as sedimentation rate, and solid-liquid separation was sufficient in terms of SS concentration in the treated water. The settling property was also comparable to that of gravity settling of activated sludge. However, the air-dried material concentrations in the sediment were low, and dewatering treatment after air-drying might be necessary when the area for air-drying was not sufficient. The mixing time only affected the sedimentation rate, with the highest sedimentation rate of 82% at a mixing time of 1 hour. The remaining indices were not affected by the mixing time. The settling property in the mixing time was better than that in the mixing intensity experiments. It might be caused by the difference in the concentrations of raw water used for the experiments.

Keywords: Swine wastewater, Batch reactor, Mixing intensity, Mixing time

1. はじめに

養豚廃水中には多量のリン・窒素・カリウムが含まれており、これらは閉鎖的流域において富栄養化等の水質汚濁を引き起こす原因となっている¹⁾。現在、国内では一律排水基準（窒素:120mg/L、リン:16mg/L）が設定されているが、畜産農家については暫定排水基準（窒素:130mg/L、リン:22mg/L）が設定されている²⁾。暫定排水基準が一時的な処置であることを踏まえると、早急な対応が必要である。一方、リン、カリウムは化学肥料や農薬に活用されている。世界の人口増加に伴って食料需要が増加することが予想されており、その影響でリン、カリウム資源の需要も増加する可能性がある。しかし、日本においてリン及びカリウム鉱石の産出がなく、海外からの輸入に依存しているため³⁾、将来的にリン、カリウムの輸入が困難になる可能性がある。以上より、水環境および資源循環の観点から、養豚廃水からリン・窒素・カリウムを回収・再資源化する必要がある。

養豚廃水から窒素、リン、カリウムを回収する方法に、MAP ($MgNH_4PO_4$) 法と MPP ($MgKPO_4$) 法がある。養豚廃水から MAP

と MPP を同時回収することについて、土手ら⁴⁾は、P 残存濃度が低く、N、K を高い回収率で回収する条件（pH=10.5、P/(N+K)=1.3、Mg/P=1.2）を決定した。押方⁵⁾は、回分式回収装置を用いて上記条件で N、P、K の同時回収実験を行い、N と K の合計の平均回収率は攪拌強度 31sec^{-1} で最大 (91%)、P の肥効成分回収率は攪拌強度によらず 100% となり、水処理と資源回収の観点から、攪拌強度 31sec^{-1} が最適であることを報告した。しかし、この報告では繰り返し 1 回であるため、実験結果の再現性を確認する必要がある。また、検討している G 値は実質 2 条件 ($31(1/s)$ 、 $109(1/s)$) のみであり、中間の G 値についても検討する必要がある。

本研究では、押方⁵⁾が検討した攪拌強度範囲での処理性能の挙動を明らかにすることを目的とし、回分式の反応装置を用いて攪拌強度の中央値を追加した条件で繰り返し実験を行った。また、攪拌時間の影響についても検討した。

2. 実験方法

2.1 養豚廃水及び処理原水の調整

実験に用いた養豚廃水は、宮崎県内の養豚場から固液分離後の廃水 20L を採取した。2020 年 10 月に採取したものを養豚廃水 A、11 月に採取したものを養豚廃水 B と呼ぶこととする。採取した養豚廃水の pH と電気伝導度を測定した後、一部を採取し $4,000\text{rpm}$ で 5 分間遠心分離後、残渣を 105°C

a) 社会環境システム工学科教授

b) 社会環境システム工学科学部生

c) 社会環境システム工学科准教授

で24時間乾燥させてSS濃度を求めた。全濃度測定用に養豚廃水100mLに濃硝酸1mLを加えて全量50mLまで蒸発させ、濃硝酸5mLを加え30分加熱分解を行い、47mmのGFBフィルターを用いて吸引ろ過した。また、溶存態濃度測定用に養豚廃水を4,000rpmで5分間遠心分離後、0.45 μ mのメンブランフィルターでろ過した。

処理原水は、処理原水中の溶存態のP/(N+K) (NH₄-NとKの合計に対するPのモル比。以後、NH₄-NをNと表記する。)が1.3、Mg/Pが1.2となるようにH₃PO₄溶液(45,000mg/L)、MgCl₂溶液(25,000mg/L)を養豚廃水に加えて調整した後、冷蔵庫で保存した。養豚廃水Aから作成したものを処理原水A、養豚廃水Bから作成したものを処理原水Bと呼ぶこととする。処理原水は調整後、養豚廃水と同じようにSS濃度を求め、全濃度分析用試料と溶存態濃度分析用試料を得た。

2.2 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。反応槽は2Lのポリバケツを用い、反応槽の攪拌には攪拌機(EYELA、ZZ-1100)と長方形攪拌翼(縦2.0cm、横7.2cm)を用いた。反応槽への5MのNaOH添加は添加用ポンプ(ATTO、AC-2110)を用い、外径7mm、内径5mmのチューブを用いた。反応槽のpHコントロールはpH調整器(NISSIN、NPH-660NDE)と5MのNaOH制御用ポンプ(NISSIN、NRP-76)を用い、外径4mm、内径2mmのチューブを用いた。添加した5MのNaOH量を測定・記録するためにデジタルはかり(カスタム、CS-2000S)を用いた。また、反応槽の処理水を処理水受けに移す際に、外径7mm、内径5mmのチューブを用いた。

2.3 攪拌強度検討実験

押方⁵⁾の結果を確認するため、沈降速度、K、N回収率が高かった攪拌強度3条件に中央値71sec⁻¹を加えた4条件(27sec⁻¹(攪拌速度:50rpm、反応体積:2L)、71sec⁻¹(攪拌速度:75rpm、反応体積:1L)、31sec⁻¹(攪拌速度:50rpm、反応体積:1.5L)、109sec⁻¹(攪拌速度:100rpm、反応体積:1L))で処理原水Aを用いて繰り返し3回反応・沈降実験を行った。

反応槽に原水を所定量加え、NaOH添加用のポンプの目盛りを2.0に設定後、所定の攪拌速度(50、75、100rpm)で攪拌を開始し、NaOH添加用ポンプを作動させて所定時間(1Lの場合:6分、1.5Lの場合:90分、2Lの場合:12分)で添加した。その後、NaOH添加用ポンプを止め、pHが一定となつてからpHを10.5に制御し、pHが10.45に達してから2時間攪拌した。このpHが10.45に達してからの攪拌している時間を攪拌時間と呼ぶこととする。

2時間攪拌後、攪拌翼とpH調整ポンプを止め攪拌機とNaOH調整チューブを反応槽から取り出し、1時間静置させ、沈殿物を沈降させた。その後、サイフォンを使って反応槽から沈殿物の10mm上まで上澄水を処理水受けに回収した。また処理水の重量と反応槽に残った沈殿物の重量を測定した。

処理水受けの処理水をよく攪拌し、SS測定用にメスシリンダーに約70mL程度取り、体積を測定後、0.45 μ mのメン

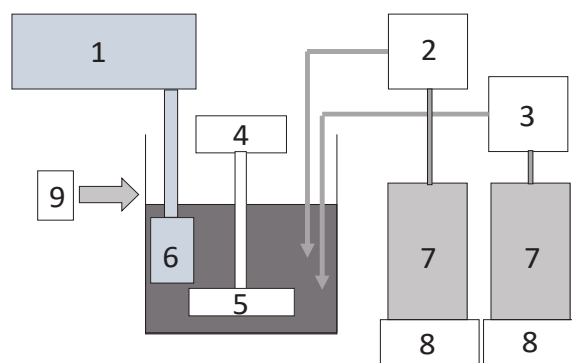


図1. 実験装置概要図.

1. pH調整器, 2. 制御用ポンプ, 3. 添加用ポンプ,
4. 攪拌機, 5. 攪拌翼, 6. pH電極, 7. 5MのNaOH, 8. はかり, 9. 反応槽

表1. 養豚廃水Aの分析結果(mg/L).

	Na	K	Ca	Mg	P	NH ₄ -N
全濃度	246	782	53	25	30	1,040
溶存態濃度	256	827	29	26	27	1,190

ランフィルターで吸引ろ過し、ろ紙上の残渣を105°Cで1日乾燥させ、処理水中のSS濃度を求めた。その後、処理受けに残った処理水のpH及び電気伝導度を測定した。

反応槽に残った沈殿物の重量を測定したあと、沈殿物の含水率を測定するために、反応槽内の沈殿物をよく混合し、ビーカーに約10g程度取り、105°Cで1日乾燥させた。さらに、風乾試料を得るために、反応槽内の沈殿物をよく混合し、沈殿物約200gをプラスチックバットに取り、室温で乾燥(風乾)した。乾燥は減少重量が0.5%以下になるまで継続した。

2.4 攪拌時間検討実験

2.3で最も性能の良かった攪拌強度である109sec⁻¹(攪拌速度100rpm、反応体積1L)において、攪拌時間を(0.5h、1.0h、2.0h)の3条件に変更し、処理原水Bを用いてそれぞれ2.3と同様に反応・沈降実験を繰り返し3回行った。

2.5 分析方法

Nはインドフェノール青吸光光度法、PはICP-AES(SHIMADZU、ICPS-8100)、K、Mg、Na、Caはフレーム原子吸光光度法(日立、Z-2000)で分析した。

3. 結果と考察

3.1 養豚廃水と処理原水

養豚廃水Aの分析結果を表1に示す。表には示さないが、pH8.23、電気伝導度1.10 S/m、SS濃度8.0mg/Lであった。Nは全濃度が溶存態濃度よりも小さく、全濃度の分解方法に問題があると考えられた。これら以外の元素については、溶

表 2. 処理原水 A の分析結果 (mg/L).

	Na	K	Ca	Mg	P	NH ₄ -N
全濃度	191	663	2	3,290	3,550	775
溶存態濃度	189	677	2	3,130	3,470	978

表 3. 養豚廃水 B の分析結果 (mg/L).

	Na	K	Ca	Mg	P	NH ₄ -N
全濃度	405	1,400	63	33	69	1,440
溶存態濃度	428	1,480	66	35	73	1,530

表 4. 処理原水 B の分析結果 (mg/L).

	Na	K	Ca	Mg	P	NH ₄ -N
全濃度	315	1,020	3	4,210	4,380	1,050
溶存態濃度	327	1,070	3	4,010	4,420	1,120

存態と全濃度はほぼ一致しており、主に溶存態で存在していた。処理原水 A の分析結果を表 2 に示す。表には示さないが、pH2.27、電気伝導度 2.84 S/m、SS 濃度 7.9mg/L であった。N は全濃度が溶存態濃度よりも小さく、全濃度の分解方法に問題があると考えられた。これ以外の元素では溶存態と全濃度はほぼ一致していた。また、処理原水中の P/(N+K) と Mg/P について、P/(N+K) は 1.29、Mg/P は 1.15 で設定した値通りであった。

養豚廃水 B の分析結果を表 3 に示す。表には示さないが、pH7.89、電気伝導度 2.35 S/m、SS 濃度は 241mg/L であった。全元素において、溶存態と全濃度はほぼ一致しており、主に溶存態で存在していた。処理原水 B の分析結果を表 4 に示す。表には示さないが、pH3.24、電気伝導度 3.20 S/m、SS 濃度 123mg/L であった。全元素において溶存態と全濃度はほぼ一致していた。また、処理原水中の P/(N+K) と Mg/P について、P/(N+K) は 1.33、Mg/P は 1.16 で設定した値通りであった。

3.2 攪拌強度の検討

図 2 に実験結果を示す。沈降率 (%) は、1 から処理原水体重積に対する沈殿物体積の比を引いて求めた。処理水収率 (-) は処理原水重量当たりの処理水重量として、風乾物収率 (g/kg-処理原水) は、処理原水重量に対する風乾物重量として、沈殿物中の風乾物濃度 (%) は、沈殿物重量当たりの風乾物重量として、それぞれ求めた。4 つの G 値における実験結果について平均値の差の検定を行った結果、すべての指標について有意水準 0.05 で G 値の違いによる有意差は見られなかった。図 2a) から沈降率の平均は 52% (変動の幅: 48~54%) であった。本研究の結果、G 値は沈降率に影響を与えないことが分かった。図 2b) に処理水の SS 濃度を示すが、平均 10% (7~13%) であり、処理水 SS 濃度の観点からは固液分離は十分に行われていた。図 2c) に沈殿物含水率を示すが、平均 95% (変動の幅: 95~95%) であった。活性汚泥の濃

縮汚泥の含水率 98% とほぼ同程度であることから⁶⁾、活性汚泥での重力沈降と同程度の沈降性であったと言えた。図 2d) に処理水収率を示すが、平均 0.5 (-) (変動の幅: 0.4~0.5 (-)) であり、処理原水の 50% が生物処理されることになり、生物処理能力を 1/2 に減らせる可能性があった。図 2e) に風乾物収率を示すが、平均 38g/kg (変動の幅: 35~41g/kg) であり、処理原水 1kg から風乾物を 38g 回収できることが分かった。図 2f) に沈殿物中の風乾物濃度を示すが、平均 6.5% (変動の幅: 6.1~7.2%) と低かった。風乾に必要な面積が確保できない場合は、脱水処理を検討する必要があると考えられた。

以上より、検討した範囲で G 値は回分式回収装置の性能に対して影響を与えなかった。処理水の SS 濃度の観点から固液分離は十分であった。沈降性も活性汚泥の重力沈降と同程度だった。しかし、沈殿物中の風乾物重量が低いことから、風乾に必要な面積が確保できない場合は、脱水処理を検討する必要があると考えられた。

3.3 攪拌時間の影響

図 3 に実験結果を示す。各指標は 2.2 と同様に定義する。図 3a) に沈降率の結果を示すが、3 つの攪拌時間における沈降率について平均値の差の検定を行った結果、有意水準 0.05 で優位差が見られた。図から攪拌時間 1 時間で最も高い沈降率 82% を示した。なお、沈降率が攪拌強度の検討実験より高くなっている理由としては、処理原水 B の元素濃度が処理原水 A と比べて大きくなり、沈降しやすくなった可能性が考えられた。

残りの指標については、3 つの攪拌時間における平均値の差の検定を行った結果、すべての指標について有意水準 0.05 で攪拌時間の違いによる有意差は見られなかった。SS 濃度は攪拌強度検討実験の結果よりも平均で 7% 高くなったが、沈殿物含水率は低く、処理水収率は高く、沈殿物中風乾物濃度が高くなっていることから、沈殿率同様攪拌強度検討実験よりも沈殿物の沈降性は良かった。これらも処理原

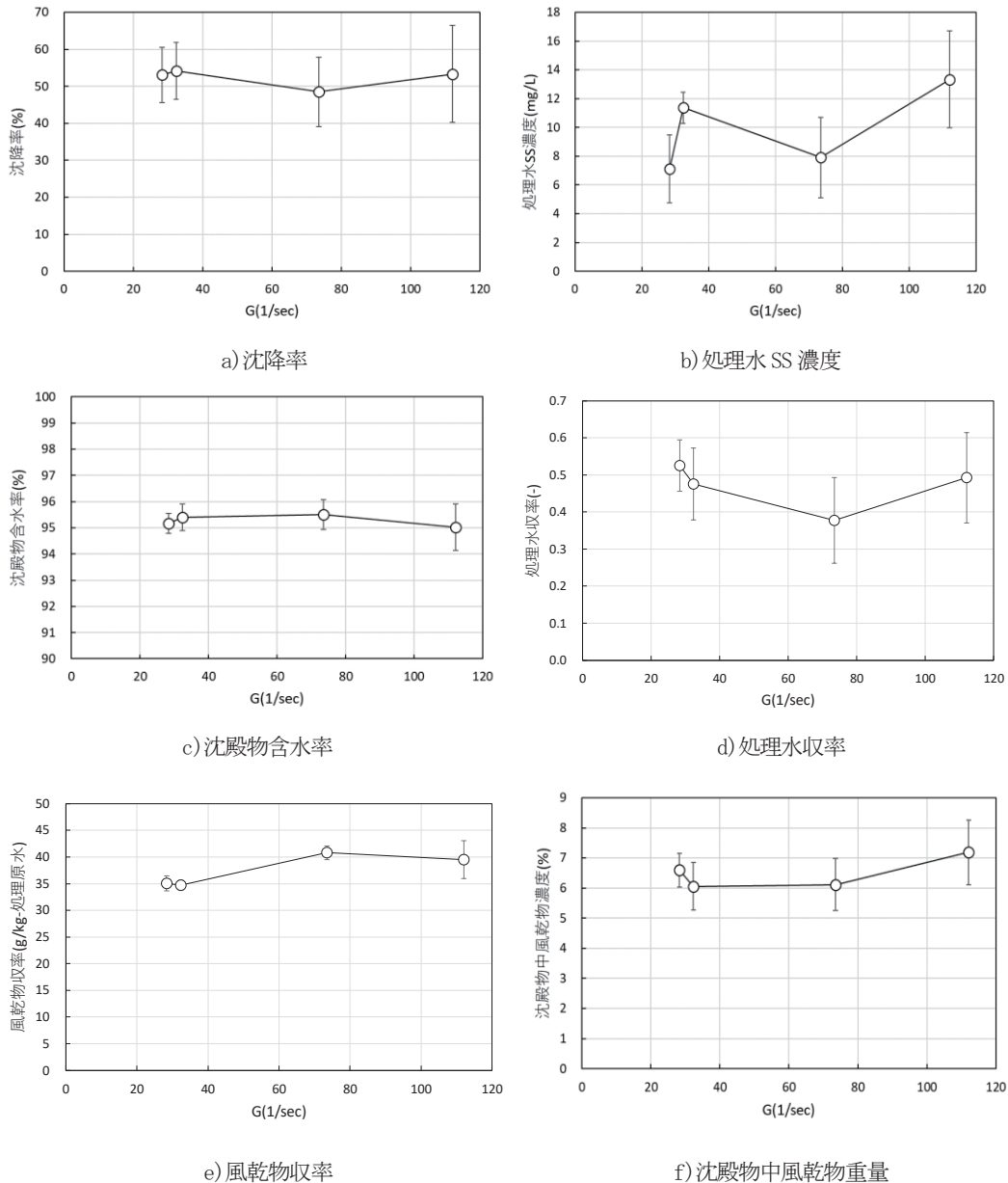


図 2. 攪拌強度の影響.

水濃度の違いが沈降性の違いに影響している可能性が考えられた。なお、風乾物収率は攪拌強度検討実験と同程度であった。

以上から、検討した範囲で攪拌時間は回分式回収装置に対して沈降率にのみ影響を与えており、攪拌時間 1 時間の時に最も高い沈降率 82%となった。残りの指標については、攪拌時間の影響は見られなかった。攪拌強度検討実験と比べて沈降性が良かったが、その原因の 1 つとして処理原水濃度の違いが沈降性に影響している可能性が考えられた。

4. おわりに

本研究では、押方³⁾が検討した攪拌強度範囲での処理性能の挙動を明らかにすること、攪拌時間の影響を検討することを目的とし、回分式の反応装置を用いて繰り返し実験を

行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 検討した範囲で G 値は回分式回収装置の性能に対して影響を与えなかった。処理水の SS 濃度の観点から固液分離は十分であり、沈降性も活性汚泥の重力沈降と同程度だったが、沈殿物中の風乾物重量が低い場合、風乾に必要な面積が確保できない場合は、脱水処理を検討する必要があると考えられた。
 - (2) 検討した範囲で攪拌時間は回分式回収装置に対して沈降率にのみ影響を与えていた。残りの指標については、攪拌時間の影響は見られず、攪拌強度検討実験と比べて沈降性が良かった原因の 1 つとして処理原水濃度の違いが沈降性に影響している可能性が考えられた
- 今後の課題として、物理特性だけでなく、化学特性についても検討する必要がある。

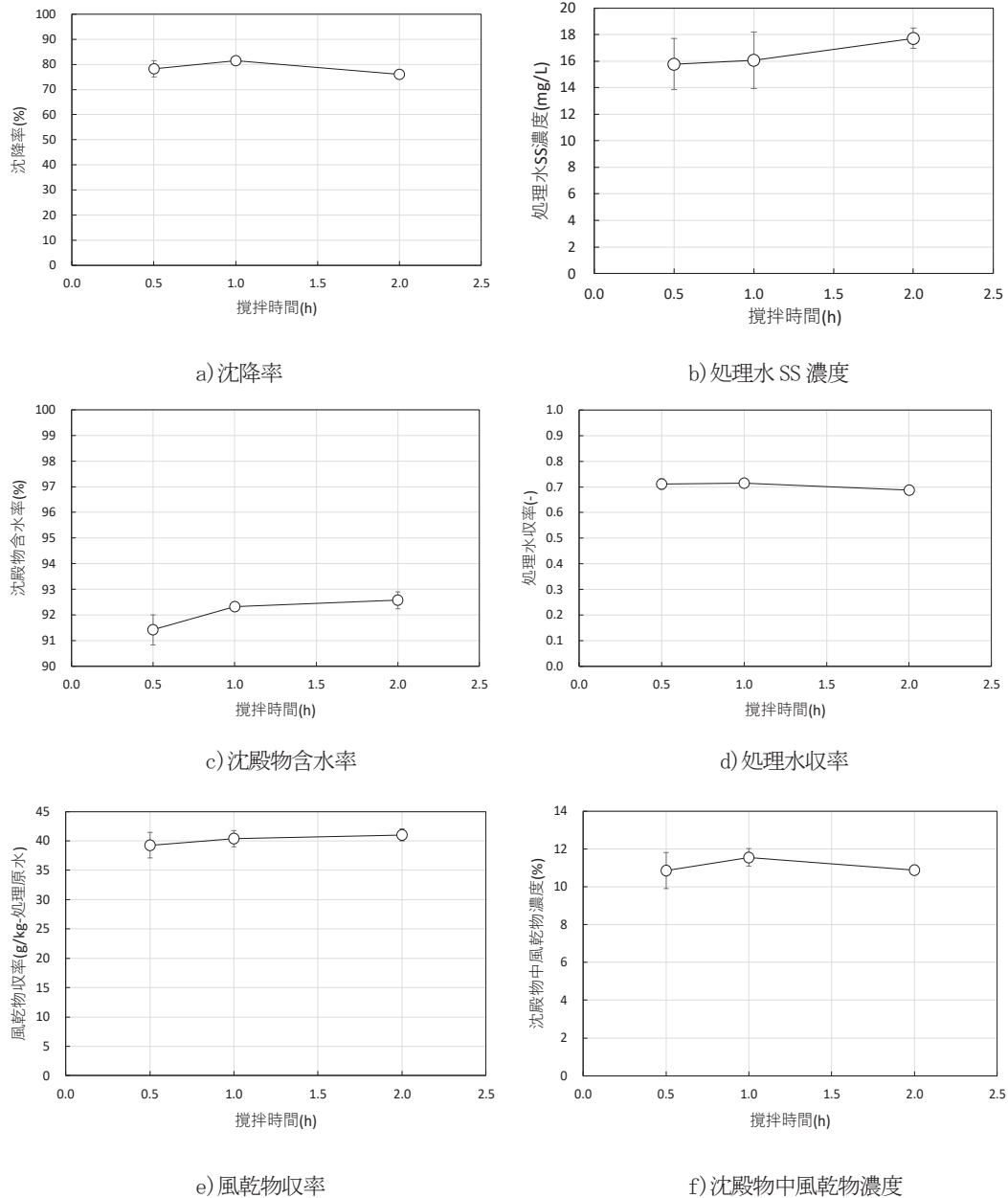


図 3. 攪拌時間の影響。

参考文献

- 1) 中野拓治、畑恭子、金城健正、渡辺暢雄：亜熱帯沿岸域を含む健全な水環境の構築と管理に向けた取組（地域の暮らしとサンゴ礁生態系つながり構築に向けて）、日本サンゴ礁学会誌、Vol. 19、pp. 95-108、2017.
- 2) 環境省、水質汚濁防止法に基づく排水規制と排水の測定・記録・保存についてのパンフレット https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/kim_o_su.pdf (2022年2月7日閲覧).
- 3) 松八重一代：持続可能な農業用栄養塩管理に向けて、日本 LCA 学会誌、Vol. 14、No. 2、pp. 119-120、2018.
- 4) 土手裕・関戸知雄：養豚廃水からのカリウム回収率向上と回収後溶液の生物処理への影響、廃棄物資源循環学会論文誌、Vol. 31、pp. 38-46、2020.
- 5) 押方杏介：回分式反応装置を用いた養豚廃水からの N、P、K 同時回収、宮崎大学院工学研究科環境系コース修士論文、2019.
- 6) [汚泥処理・資源化 - 環境技術解説 | 環境展望台：国立環境研究所 環境情報メディア \(nies.go.jp\)](https://www.nies.go.jp/) (2022年2月7日閲覧).