

大豆湯煮廃水の二相嫌気性処理の条件検討

Examination of conditions for two-phase anaerobic treatment of soybean boiling wastewater

岡井 隆 多田 篤史*
Takashi OKAI Atsushi TADA

要 旨

既報では、嫌気性汚泥として、下水処理場の消化汚泥と乾式メタン発酵施設におけるメタン発酵槽内の汚泥を用いた大豆湯煮廃水の処理実験を行い、グラニュール汚泥の代替汚泥として有望であることを報告した。今般、これらの嫌気性汚泥を用いて前段に酸生成槽、後段に嫌気処理槽からなる二相嫌気性処理にて大豆湯煮廃水の処理実験を行った結果、嫌気処理槽の水温が 20℃の場合でも水理学的滞留時間（HRT）が 3 日の条件で処理目標である全有機炭素（TOC）160 mg/L 以下を達成することができた。

Abstract

In a previous report, we conducted treatment experiments on soybean boiling wastewater using digested sludge from sewage treatment plants and sludge from methane fermentation tanks in dry methane fermentation facilities as anaerobic sludge, and reported that these sludges are promising alternatives to granular sludge. In this study, we conducted treatment experiments on soybean boiling wastewater using these anaerobic sludges in a two-phase anaerobic process consisting of an acidification tank in the first stage and an anaerobic treatment tank in the second stage. The results showed that, even when the water temperature in the anaerobic treatment tank was 20°C, the government target of TOC of 160 mg/L or less could be achieved with an HRT of 3 days.

キーワード：二相嫌気性処理 全有機炭素（TOC） 水理学的滞留時間（HRT）

I はじめに

当所では、小規模な食品製造工場から排出される比較的高い有機性廃水を対象とし、設置費及び維持管理費等の経済的負担の抑制や省スペースで運転管理が容易であることといった課題に対応できる排水処理方式について検討を行っている。

すでに、前段に嫌気性ろ床法を後段に膜分離活性汚泥法を組み合わせた排水処理装置を用いて大豆湯煮廃水（全有機炭素（TOC）1,500～2,500 mg/L）の処理実験を行い、処理水質が処理目標である TOC 160 mg/L 以下を十分に達成できることを報告した^{1)、2)、3)}。

また、この処理方式で、嫌気性処理に用いる種汚泥として、下水処理場の消化汚泥（以下、「消化汚泥」という。）と乾式メタン発酵施設におけるメタン発酵槽内の汚泥（以下、「メタン発酵槽汚泥」という。）をそれぞれ用いた処理実験を行い、水理学的滞留時間（HRT）が 1 日の場合でも、水温や廃水の濃度の条件によっては、嫌気性処

理後の水質が処理目標をクリアし、いずれも嫌気性処理における種汚泥として有望であることを報告した³⁾。

さらに、大豆湯煮廃水を用いてこの処理方式（嫌気性ろ床法＋膜分離活性汚泥法）の設置及び維持管理コストを試算した結果、標準活性汚泥法を用いた場合と比較すると、大幅なコスト削減が可能であることを示した⁴⁾。維持管理コストの内訳は、汚泥処分費及び電気代の占める割合が大きく、これらは膜分離活性汚泥法の処理工程で生じる余剰汚泥の処分及び曝気に要する電力消費量に大きく起因するものであることから、この工程を省くことができれば、大幅なコスト削減が見込める。

今後、更なるコスト削減を指向する場合、これまで検討してきた処理方式における運転条件の見直しだけでは大きな進展は見込めない。そこで、野心的な目標ではあるが、膜分離活性汚泥法を用いず、前段に酸生成槽、後段に嫌気処理槽からなる二相嫌気性処理により処理目標を達成すべく、処理条件の検討を行った。

* 香川県環境管理課

II 方法

1 実験装置

実験に用いた排水処理装置は、図1に示すように原水調整槽、酸生成槽、嫌気処理槽及び放流水槽から成り、図1中点線で囲った部分（送液ポンプ2台、嫌気処理槽、放流水槽）については、並列で2系列設けた。排水処理装置の1日処理量は、表1に示すように嫌気処理槽のHRTに応じて2系列合わせて8 Lまたは6 Lとした。

原水調整槽は、大豆湯煮廃水（以下、「原水」という。）を貯留する水槽であり、排水処理装置の1日処理量を十分に貯留できる容積を有する。原水の pH を調整するための薬剤注入装置、原水と薬剤の混合及び原水の腐敗防止のための散気球、原水を酸生成槽に移送するためのポンプが備えられている。

酸生成槽は、十分な濃度の揮発性有機酸(VFA)を安定して生成する役割を担うが、既報⁵⁾の検討結果を踏まえてHRTを0.5日、有効容積は表1のとおりとした。酸生成槽の水温を30℃に保つため恒温水槽内に設置した。また、原水調整槽から酸生成槽に流入した原水を槽内で均一にするための磁気攪拌器、後段の2系列の嫌気処理槽に槽内の水を移送するためのポンプが備えられている。

嫌気処理槽は、HRTを2日に設定する場合、有効容積を8 L、HRTが3日の場合は9 Lとし（表1）、いずれの場合も塩化ビニル樹脂製の角型槽の内部を仕切板（下部にスリットが設けられている）により2等分し、側面に流入管及びオーバーフロー管を取り付けたものを使用し、上面を塩化ビニル樹脂製の蓋で覆った。接触材には、ポ

リプロピレン製で比表面積51 m²/m³のもの（関西化工株式会社製 MGM-2550-P100）を用い、1室及び2室の中層部に接触材を充填した。水温を一定に保つため、嫌気処理槽を恒温水槽内に設置した。

放流水槽は嫌気処理槽による処理水を貯留する水槽であり、排水処理装置の1日処理量を貯留できる容積を有する。処理水の腐敗防止のための散気球が備えられている。

2 実験条件

供試排水には、県内の煮豆製造工場にて採取した原水を原水調整槽に投入し、TOCが1,500 mg/Lまたは2,500 mg/Lになるように水道水で希釈した後、10 %水酸化ナトリウム水溶液を添加してpHを7.0に調整（調整前pH4～6）したもの（以下、TOCを1,500 mg/Lに調製したものを「低濃度原水」、2,500 mg/Lに調製したものを「高濃度原水」という。）を用いた。原水調整槽への原水の投入は基本的に土日祝日を除く平日の午前中に開始し、丸1日かけて酸生成槽に移送した。

嫌気処理槽に投入する污泥は、既報³⁾の実験終了後のものであり、高松市東部下水処理場の消化污泥及び株式会社富士クリーンのメタン発酵槽内の污泥をそれぞれ種污泥として、消化污泥については149日間、メタン発酵槽污泥については139日間にわたり大豆湯煮廃水の処理実験に供したものである（以下、それぞれ「消化污泥の馴養污泥」、「メタン発酵槽污泥の馴養污泥」という。）。

実験に用いた污泥の強熱減量（VSS）及び投入量は、消化污泥の馴養污泥が15 gVSS/L、6.7 Lであり、メタン発酵槽污泥の馴養污泥が22 gVSS/L、4.5 Lであり、それぞれ別々の嫌気処理槽に投入した。以後、消化污泥の馴養污泥を用いて処理する工程を「T系列」、メタン発酵槽污泥の馴養污泥を用いて処理する工程を「F系列」とする。

嫌気処理槽の運転条件については、表2に示すように水温、HRT、原水TOCを段階的に変化させて実験した。

表1 排水処理装置の1日処理量と各槽のHRT、容積

1日処理量 (L)	酸生成槽		嫌気処理槽×2基	
	HRT (日)	有効容積 (L)	HRT (日)	有効容積 (L)
8	0.5	4	2	8
6		3	3	9

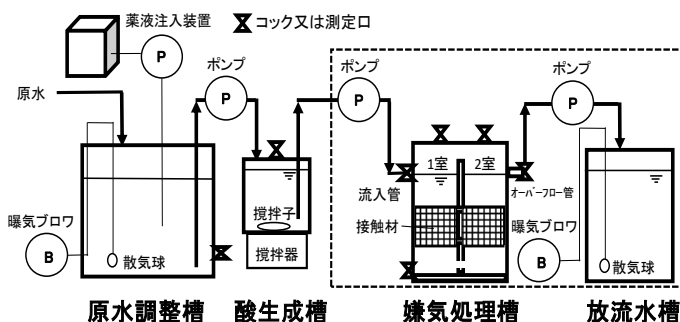


図1 排水処理装置（二相嫌気性処理）

表2 嫌気処理槽の運転条件

条件	水温 (°C)	HRT (日)	原水 TOC (mg/L)
1	30	2	1,500 (低濃度原水)
2			2,500 (高濃度原水)
3	20	2	1,500 (低濃度原水)
4		3	1,500 (低濃度原水)
5			2,500 (高濃度原水)

表3 排水処理装置の運転状況の確認項目及び水質調査項目

測定・試料採取箇所	運転状況の確認				水質調査			
	水温	水量	pH	ORP	TOC	COD _{Cr}	VFA	SS
原水調整槽	○	○	○	—	○	○	○	○
酸生成槽	○	○	○	○	○	○	○	—
嫌気処理槽(1室)	○	○	○	—	○※	—	○	—
嫌気処理槽(2室)	—	○	○	○	○※	○※	○※	—
放流水槽	○	○	○	—	○	○	○	○

※ 運転状況を見ながら必要に応じて調査を行う

排水処理装置の運転状況の確認項目及び水質調査項目については、表3に示すとおりである。運転状況の確認項目は、基本的に土日祝日を除く平日に、いずれも水温計やpH計、酸化還元電位（ORP）の測定機器のセンサーを各槽内に挿入することにより計測した。

水温やHRTを変えた場合は、ある程度慣らし運転を行った後、水質調査については、基本的に月曜日、水曜日、金曜日に実施した。定期調査の結果としては金曜日に実施したものを採用した。

水質調査に供する試料は、運転状況を確認した後、各槽から採取したものを用いた。水質調査の方法は、TOC、SSについては工場排水試験方法、揮発性有機酸（VFA）については下水試験方法に準じてガスクロマトグラフ法により行った。化学的酸素要求量（COD_{Cr}）についてはLovibond製のテストチューブ試薬及び携帯用水質測定器COD計（重クロム酸法）を使用して行った。

汚泥調査に供する試料は、表2の条件2及び条件5の実験終了時に嫌気処理槽内に堆積した汚泥及び接触材に付着した汚泥を回収して全量を計量した後、攪拌して均一にしたものを用いた。

汚泥の分析項目は、SSの強熱減量（VSS）とし、下水試験方法に準じて測定を行った。また、実験期間中に嫌気処理槽で増加した汚泥の重量と嫌気処理槽でのCOD_{Cr}除去量から汚泥発生率を算出した。

Ⅲ 結果と考察

1 排水処理装置の運転状況の確認結果

実験期間中、排水処理装置の稼働状況に大きなトラブルはなく、計画した量の原水を処理することができた。

酸生成槽の水温の平均値は30.1℃で±2℃以内に管理されており、pHは平均6.7(6.2～7.7)であった。ORPは平均-430 mVであり、概ね平均値±50 mVの範囲内で安定的に推移した。

嫌気処理槽のpHは、T系列の1室で平均7.1(6.3～7.7)、2室で平均7.4(6.8～7.9)であった。F系列では1室で平均7.0(6.3～7.7)、2室で平均7.3(6.9～7.7)であり、両系列で大差なかった。嫌気処理槽2室のORPの平均値は、T系列で-487 mV、F系列で-473 mVであり、いずれの場合も概ね平均値±30 mVの範囲内で安定的に推移した。

放流水槽のpHの平均値は、T系列で8.3、F系列で8.2であり、両系列で大差なかった。

2 水質調査結果

各条件における放流水のTOCの推移を図2に、各工程のTOCの分析結果（定期調査）を表4に示す。図中の経過日数については、汚泥を嫌気処理槽に投入した日を起算とする経過日数を表しており、x軸上に示されている日数が金曜日に対応するようプロットしている。

放流水のTOCの推移の傾向は、T系列とF系列を比較

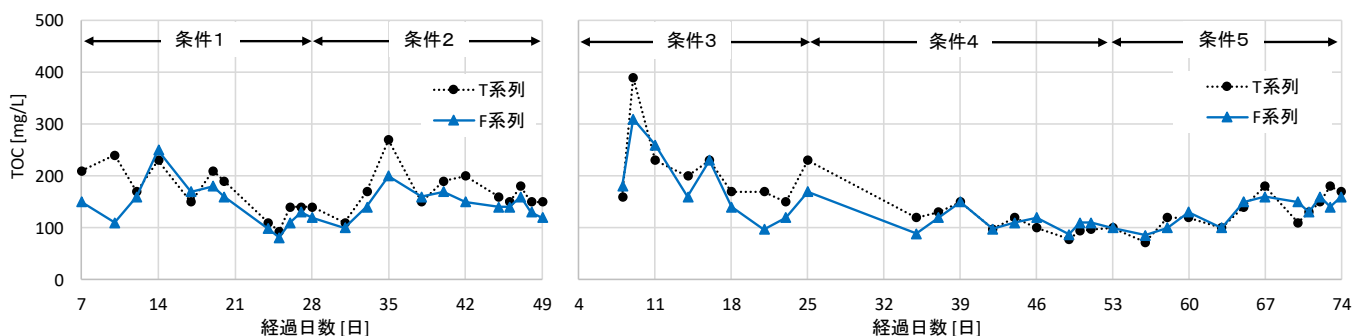


図2 各条件における放流水のTOCの推移

表4 各工程のTOC分析結果(定期調査(各条件ともにn=3))

上段: 平均値、下段: 最小値~最大値

条件	水温 (°C)	嫌気処理槽 HRT (日)	TOC (mg/L)					
			原水	酸生成	T系列		F系列	
					放流水	除去率 (%)	放流水	除去率 (%)
1	30	2	1,530 (1,500~1,600)	970 (910~1,000)	190 (140~230)	88 (85~91)	180 (120~250)	88 (83~92)
2			2,400 (2,100~2,600)	1,830 (1,700~2,000)	210 (150~270)	91 (87~94)	160 (120~200)	93 (90~95)
3	20	2	1,530 (1,300~1,800)	1,060 (980~1,100)	210 (170~230)	86 (82~89)	190 (140~260)	87 (80~91)
4		3	1,670 (1,500~1,900)	1,100 (1,000~1,200)	120 (100~150)	93 (91~95)	120 (100~150)	93 (91~94)
5			2,600 (2,300~2,800)	2,100 (2,000~2,200)	160 (120~170)	94 (93~96)	150 (130~160)	94 (93~95)

すると大きな違いは見られないが、HRTを2日に設定した条件1~3のTOCが約80~400 mg/Lで変動しているのに対し、HRTを3日に設定した条件4、5では約70~180 mg/Lであり、後者の条件で変動幅が小さくなっていることが見てとれる。特にF系列では、後者の条件において全期間にわたり処理目標である160 mg/L以下を達成することができた。定期調査における放流水のTOC平均値は、条件1~3で160~210 mg/L、条件4、5では120~160 mg/Lであった。

T系列のVFAの分析結果では、条件3では放流水中にVFAが最大で450 mg/L (TOC換算で205 mg/Lに相当) 残存していたが、条件4、5では全て10 mg/L未満であった。以上の結果から、HRTを2日から3日に延長することにより嫌気処理槽中のVFAの分解がより進行し、処理水質が安定化したと考えられた。この挙動はF系列でも同様であった。一方で、嫌気処理槽のHRTが3日を要することにより、排水処理装置の省スペース化の観点からは課題が残った。

また、酸生成槽のVFAの平均値は、低濃度原水の場合1,730 mg/L、高濃度原水の場合3,360 mg/Lであり、月曜日に低下する傾向があるものの、概ね安定してVFAが生成されていることが確認できた。酸生成槽の水温がVFAの生成に与える影響について比較検討を行った既報⁵⁾では、水温20℃では30℃の場合よりもVFAが約2割少なかった(HRT0.5日の場合)ことから、今回の実験において、前段に酸生成槽を設け、水温30℃でVFAの生成を効率的に行い、後段の嫌気処理槽にVFAの分解を担わせる二相嫌気性処理の採用が奏功したと評価できる。

3 汚泥調査結果

条件2及び条件5の終了時に嫌気処理槽から引き抜いた汚泥の調査結果を表5に示す。

T系列については、条件1、2の実験期間中に嫌気処理槽から放流水槽に流出したSSは、原水調整槽から流入するSSよりも少なかったにもかかわらず、条件2終了後に引き抜いた汚泥の重量は投入時よりも減少しており、汚泥発生率は負の値となった。水温20℃で実施した条件3~5の汚泥発生率は0.044 kgVSS/kgCOD_{Cr}であった。HRTを延長することにより汚泥負荷は減少し、一般的に汚泥負荷が低い場合は汚泥発生率も低くなることが知られているが⁶⁾、既報³⁾(消化汚泥の馴養汚泥を用い、水温20℃、HRT1日の条件下で行った処理実験)の汚泥発生率0.033 kgVSS/kgCOD_{Cr}と比較するとやや高くなった。

F系列については、条件1、2の汚泥発生率は0.059 kgVSS/kgCOD_{Cr}であり、条件3~5では0.023 kgVSS/kgCOD_{Cr}であった。条件3~5の汚泥発生率は、既報³⁾(メタン発酵槽

表5 嫌気処理槽の汚泥調査結果

	HRT (日)	水温 (°C)	VSS (g/L)	汚泥発生率 (kg-VSS /kg-COD _{Cr})	汚泥 引抜き
消化汚泥の 馴養汚泥 (T系列)	2	30	11	-0.041	条件2 終了後
	2 → 3	20	13	0.044	条件5 終了後
メタン発酵槽 汚泥の馴養汚泥 (F系列)	2	30	17	0.059	条件2 終了後
	2 → 3	20	16	0.023	条件5 終了後

汚泥の馴養汚泥を用い、水温 20 ℃、HRT1 日の条件下で行った処理実験(スカムを含めない)の汚泥発生率 0.024 kgVSS/kgCOD_{Cr}と同程度であった。

IV まとめ

消化汚泥と乾式メタン発酵槽汚泥それぞれについて大豆湯煮廃水で馴養した汚泥を用い、前段に酸生成槽、後段に嫌気処理槽からなる二相嫌気性処理による排水処理装置を用いて大豆湯煮廃水の処理実験を行った。

放流水の TOC は、HRT を 2 日に設定した条件では約 80 ～400 mg/L で変動し、定期調査における平均値は 160 ～210 mg/L であったが、HRT を 3 日に設定した条件では約 70 ～180 mg/L と変動幅が小さくなり、定期調査における平均値も 120 ～160 mg/L まで低下した。特にメタン発酵槽汚泥の馴養汚泥を用いた場合、HRT が 3 日の条件では全期間にわたり処理目標である 160 mg/L 以下を達成することができた。

VFA の分析結果から、前段の酸生成槽では安定して VFA が生成しており、後段の嫌気処理槽では HRT が 3 日の条件において、放流水中の VFA が 10 mg/L 未満まで減少したことから、嫌気処理槽中で VFA の分解が十分に進行し、処理水質が安定化したと考えられた。

文献

- 1) 岡井隆, 坂本憲治:嫌気性ろ床法と膜分離活性汚泥法を組み合わせた排水処理装置を用いた煮豆製造排水の処理特性, 全国環境研会誌, 45(2), 16-21, (2020)
- 2) 岡井隆, 坂本憲治:嫌気性ろ床法と膜分離活性汚泥法を組み合わせた排水処理装置を用いた煮豆製造排水の処理特性(第 2 報), 香川県環境保健研究センター所報, 20, 35-40, (2021)
- 3) 岡井隆, 多田篤史:嫌気性ろ床法と膜分離活性汚泥法を組み合わせた排水処理装置を用いた煮豆製造排水の処理特性(第 3 報), 香川県環境保健研究センター所報, 22, 36-41, (2023)
- 4) 坂本憲治, 岡井隆:小規模事業場向け排水処理施設の設置及び維持管理コストの試算と評価, 香川県環境保健研究センター所報, 19, 41-44, (2020)
- 5) 多田篤史, 岡井隆:二相嫌気性処理の酸生成槽における大豆湯煮排水を用いた酸生成条件の検討結果, 香川県環境保健研究センター所報, 23, 41-45, (2024)
- 6) 須藤隆一:微生物固定化法による排水処理, 102-109, 株式会社産業用水調査会, 東京(1988)