

<報 文>

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*

岡井 隆**・坂本憲治**

キーワード ①嫌気性ろ床法 ②膜分離活性汚泥法 ③排水処理 ④余剰汚泥

要 旨

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て、高濃度で負荷変動が大きい煮豆製造工場の排水の処理実験を行い、グラニューク汚泥を種汚泥とする嫌気性ろ床は、水温20℃でも70%以上の高い除去率を有し、余剰汚泥の発生量も少ないことなど基本的な処理性能を明らかにするとともに、現地実証試験を行い良好な処理特性を得た。

1. はじめに

本県における食品製造業の事業所数は、全製造業の約22%を占めており¹⁾、水質汚濁防止法に基づき本県に届出のある特定事業所について業種別にみると、めん類製造業、豆腐・煮豆製造業、畜産食品製造業の順に多く、この3業種で事業所数全体の60%を占める。また、排水量別にみると、めん類製造業、豆腐・煮豆製造業、みそ・しょう油等製造業は、事業所数の約半数は日平均10m³未満であり、比較的小規模な事業所が多いという特徴がある。小規模な食品製造工場の排水は、高負荷で変動が大きい場合があり、排水処理施設の導入に際しては、そのような排水に適用可能であることや、設置費及び維持管理費等の経済的負担の抑制や運転管理が容易であること等の課題がある。

この課題に対して、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方式が有効と考え、排水処理試験機を用いて実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験に用いた排水処理装置は、原水調整槽、嫌気処理槽、曝気槽、MBR槽及び放流水槽から成り、1日処理量を40Lとした(図1)。

嫌気処理には嫌気性ろ床法を採用した。嫌気処理槽は、有効容積60Lの塩化ビニル樹脂製の角型槽で、内部に仕切板を設けて3等分し、側面にオーバーフロー管を取り付けた。上面を塩化ビニル樹脂製の蓋で覆い密閉した。接触材には、ポリプロピレン・ポリエチレン製で

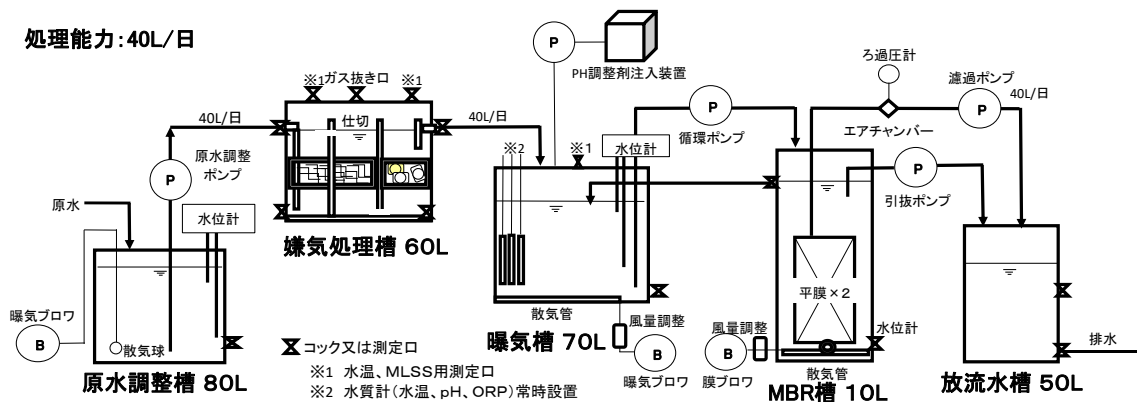


図1 排水処理装置

*Characteristics of Wastewater Treatment from Boiled-Beans Manufacturing Industry Using a Membrane Bioreactor with Pretreatment Anaerobic Filter Process

**Takashi OKAI, Kenji SAKAMOTO (香川県環境保健研究センター)

比表面積100m²/m³、空隙率93%を有するもの（関西化工株式会社製 MSF-50）を1室に、ポリプロピレン製で比表面積51m²/m³のもの（同社製 MGM-2550-P100）を2,3室に、各室の中層部に1/3の体積を占めるように充填した。嫌気処理槽を恒温水槽内に設置し、設定温度の±1℃以内になるよう管理した。種汚泥には、他工場のUASB処理装置で用いられているグラニュール汚泥を用い、嫌気処理槽に投入後、30℃で3週間馴養した。水理学的滞留時間（HRT）は、嫌気処理槽で1.5日とした。また、対照実験として、種汚泥に市販のシーディング剤を使用して実験を行った。

好気処理には膜分離活性汚泥法（MBR）を採用した。曝気槽とMBR槽の有効容積は、それぞれ70L, 10Lとし、MBR槽には株式会社クボタ製の液中膜カートリッジ（平膜0.11m²×2枚）を使用した。曝気槽とMBR槽を合わせたHRTは2日とし、曝気槽のMLSSが10,000～15,000mg/Lになるよう管理した。

2.2 実験条件（室内実験）

実験装置の基本的な処理性能を明らかにするため、供試排水には、県内の煮豆製造工場から大豆の煮汁を採取し、TOCが1,300から2,200mg/Lになるように水道水で希釈して40Lとした後、pHを7.5に調整（調整前pH4～6）したもの（以下、「原水」という。）や、同工場から排出される上記煮汁を含む総合排水を必要に応じて水道水で希釈し、pHを6.5に調整（調整前pH4～5）したものを用いた。表1、表2にいずれも希釈前の大豆の煮汁、総合排水の水質の一例を示す。

実験装置は3週間の慣らし運転を経て、原水の負荷及び嫌気処理槽の水温を30℃から10℃の間で段階的に変化させて、計188日間（基本的に土日祝日を除く。）運転を行った。総合排水の処理実験に際しては、新たに嫌気処理槽にグラニュール汚泥を種汚泥として植種し、大豆の煮汁を用いて約4カ月間馴養し、安定した処理水質を得ることを確認した後、処理性能について検討を行った。

水質試料の分析は、TOC、COD_{mn}、BOD、SS、T-N、T-Pについては工場排水試験方法²⁾、揮発性有機酸（VFA）

については下水試験方法³⁾に準じて行った。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。汚泥試料の分析は、SS、強熱減量（VSS）については下水試験方法に準じて行った。

水質試料は、原水調整槽から原水、嫌気処理槽から流出する嫌気処理水、放流水槽から放流水をそれぞれ採取したものを用いた。汚泥試料は、嫌気処理槽、曝気槽の汚泥をよく攪拌してから採取したものを用いた。

2.3 実験条件（現地実証試験）

実験装置を県内の煮豆製造工場の敷地プレハブ内に移設し、実験装置への供試排水には、煮豆製造工場の排水樹に定量ポンプを設置し、操業時間に合わせて8時間連続取水して約40Lとした総合排水を用いた。

総合排水の希釈は行わず、pHを6.5に調整したものを実験装置に導水し、水温は嫌気処理槽のみ20℃を大きく下回らないよう適時ヒーターで加温し、その他の水槽は室温で運転した。嫌気処理槽の汚泥は、総合排水の室内実験で用いたものをそのまま使用し、煮豆製造の繁忙期に差し掛かる平成30年10月1日に実験装置の慣らし運転を開始、10月12日に本格運転に移行して、翌年1月22日までの114日間にわたって稼働し（基本的に土日祝日、休業日を除いて実施）、1日当たり40Lの総合排水を処理した。水質試料及び汚泥試料の採取及び分析については、室内実験と同じ方法を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 室内実験

慣らし運転後、28～187日の原水及び嫌気処理水の水質を表3に示す。また、COD_{Cr}の推移を図2に、水温とCOD_{Cr}除去率及びTOC除去率の関係を図3に示す。

嫌気処理水のCOD_{Cr}は、28～63日の期間中、水温が30～20℃の条件下では、原水が4,400～6,900mg/Lの間で変動しても、1,100～1,700mg/Lとほぼ横ばいで推移したが、水温を10℃に下げると2,900から5,000mg/Lまで徐々に上昇した。その後、再び水温を30℃まで上げると、嫌気処理水のCOD_{Cr}は下がり、880～1,100mg/Lの間で横ばいに推移し、水温を15℃まで下げると、1,600～2,000mg/Lで横ばいに推移した。

原水に対する嫌気処理水のCOD_{Cr}の除去率は、水温30℃で平均78%（最小66～最大87%）、20℃で75%（73～78%）、15℃で69%（66～72%）、10℃で30%（22～38%）であり、水温が15～30℃の範囲では除去率に大きな差はないが、10℃になると顕著に低下した。また、TOCの除去率は、30℃で平均85%（68～92%）、

表1 大豆煮汁の水質

(単位: mg/L)	
項目	濃度
TOC	4,100
BOD	7,900
COD _{Cr}	13,700
SS	87
T-N	460
T-P	460

表2 総合排水の水質

(単位: mg/L)	
項目	濃度
TOC	4,700
BOD	6,800
COD _{mn}	7,800
SS	220
T-N	46
T-P	29

20℃で81% (79~84%) , 15℃で72% (71~74%) , 10℃で34% (27~41%) であり, COD_{Cr}よりも少し高い値であったが, 水温による影響はCOD_{Cr}と同様であった。対照実験では, 嫌気処理水のCOD_{Cr}は3,300~5,400mg/Lで推移し, COD_{Cr}の除去率は20% (17~24%) であった。

嫌気処理水の水温別のVFAについて図4に示す。VFAは, 原水のTOCが1,300~2,200mg/Lの条件下では, 水温30℃で平均200mg/L, 20℃で310mg/Lであったが, 15℃で590mg/L, 10℃で1,070mg/Lと水温の低下に伴って上昇した。また, 30℃ではpHは6.9であったが, 10℃では6.4となり, 水温の低下に伴いpHは低下した。

一方, 対照実験のVFAは, 30℃で平均2,150mg/Lであり, いずれの水温でも1,000mg/Lを超えていた。また, 30℃でpHは6.1であったことから, 嫌気処理槽内にVFAが蓄積しやすい傾向があると考えられる。

固定床式嫌気性リアクターによる処理において, リアクター内の有機酸濃度が2,000mg/Lを超えるとメタン菌を阻害するといわれているが⁴⁾, 本実験では, 水温が20℃より高ければ生成したVFAは速やかに分解されメタン菌への阻害は起こりにくいと考えられる⁵⁾。

一般に食品工場排水の嫌気性処理は36℃近辺の中温発酵で行われているが⁶⁾, 本実験では嫌気処理槽の水温が20℃以上の条件下で70%以上のCOD_{Cr}除去率が得られたことから, 加温に必要となるエネルギーが本方式では節減できる点で有利である。

実験期間中の除去COD_{Cr}量は16,077g, 実験終了後の嫌気処理槽内に蓄積した汚泥のVSSは1,121gであったことから, 汚泥発生率は0.07kgVSS/kgCOD_{Cr}と見積もられた。この結果は, 嫌気性処理における余剰汚泥の発生率の報告値⁶⁾0.03~0.12kgVSS/kgCOD_{Cr}と比較して妥当な値であった。

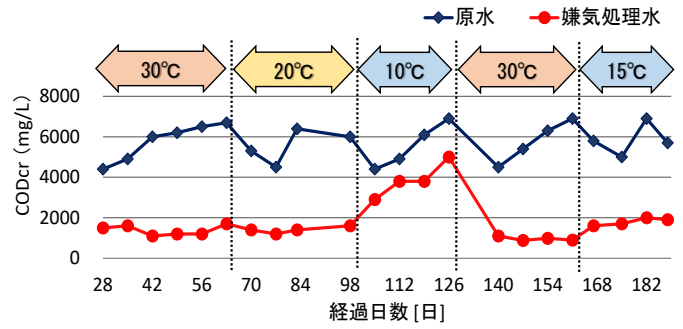


図2 原水及び嫌気処理水のCOD_{Cr}の推移

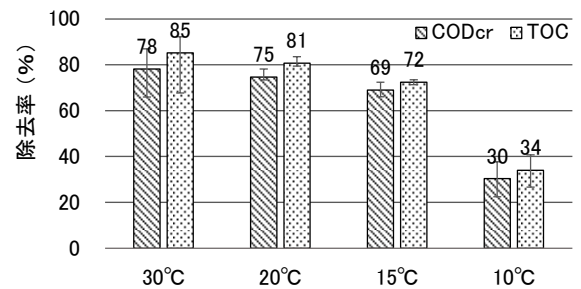


図3 原水に対する嫌気処理水のCOD_{Cr}及びTOC除去率

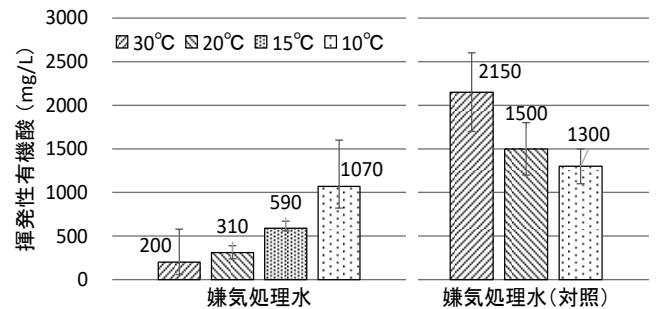


図4 嫌気処理水の水温別のVFA

表3 室内実験における原水及び嫌気処理水の水質

項目	原水	嫌気処理水				嫌気処理水 (対照)	放流水
		30℃	20℃	15℃	10℃		
pH	7.5	6.9 (6.7~7.1)	6.7 (6.7~6.8)	6.6 (6.6~6.7)	6.4 (6.1~7.1)	6.1 (5.9~6.3)	8.2 (8.0~8.6)
SS (mg/L)	220 (32~510)	170 (66~260)	250 (140~410)	140 (110~160)	220 (120~350)	50 (38~69)	<1 (<1~<1)
COD _{Cr} (mg/L)	5,710 (4,400~6,900)	1,220 (880~1,700)	1,400 (1,200~1,600)	1,800 (1,600~2,000)	3,880 (2,900~5,000)	4,380 (3,300~5,400)	-
BOD (mg/L)	3,000 (1,800~3,800)	430 (210~1,100)	440 (270~630)	950 (830~1,110)	2,350 (1,700~2,900)	2,430 (2,800~2,000)	5.0 (1.5~31)
TOC (mg/L)	1,740 (1,300~2,200)	240 (170~420)	330 (260~380)	460 (420~530)	1,160 (830~1,500)	1,270 (810~1,600)	50 (20~73)
VFA (mg/L)	440 (200~1,000)	200 (58~580)	310 (240~390)	590 (560~670)	1,070 (820~1,600)	2,150 (1,700~2,600)	-

上段は平均値, 括弧内は最小値~最大値

原水、嫌気処理水、放流水のBODの推移を図5に示す。放流水のBODは、実験期間中、嫌気処理槽の水温が10℃のときに一時31mg/Lまで上昇したが、それ以外は1.5～7.7mg/Lの間で横ばいに推移した。嫌気処理水に対する放流水のBODの除去率は、水温30～10℃で平均99.1%（最小97.7～最大99.8%）であり、原水に対するBODの除去率は、平均99.8%（最小98.7～最大99.9%）であった。また、SSは全期間にわたり1mg/L未満であり、良好な処理水質を得た。実験期間中の除去BOD量は3,691g、曝気槽から除去した余剰汚泥のSSは2,128g（VSS換算で1,829g）であったことから、汚泥転換率は0.58kgSS/kgBOD（0.50kgVSS/kgBOD）と見積もられた。この結果は、好気性処理における一般的な汚泥転換率約0.5⁷⁾と同程度であった。

次に嫌気処理槽内に汚泥を植種、馴養後に126～162日にかけて総合排水の処理実験を行った（図6）。結果を表4に、総合排水と嫌気処理水のTOCの推移及び総合排水に対する嫌気処理水のTOCの除去率の推移を図7に示す。

嫌気処理水のTOCは、総合排水のTOCが940～2,700 mg/L、水温が26～33℃の条件下では、58～1,700mg/Lで推移した。総合排水のTOCを徐々に上げていき、149日からTOC約3,000mg/Lの総合排水を嫌気処理槽に送ったところ、155日の総合排水のTOCは2,700mg/Lであったが、嫌気処理水のTOCが1,700mg/Lまで上昇し、除去率が37%に下がった。この時、嫌気処理水のpHは4.8まで低下していたことから、槽内にVFAが蓄積していることが示唆された。

表4 室内実験における総合排水、嫌気処理水、放流水の水質

項目	総合排水	嫌気処理水	放流水
水温(℃)	-	29 (26~33)	-
pH	6.5	5.8 (4.8~6.7)	8.7 (8.6~9.0)
TOC(mg/L)	1,590 (940~2,700)	690 (58~1,700)	23 (9.0~47)
BOD(mg/L)	3,020 (1,800~4,500)	1,410 (130~3,400)	1.5 (1.2~1.8)

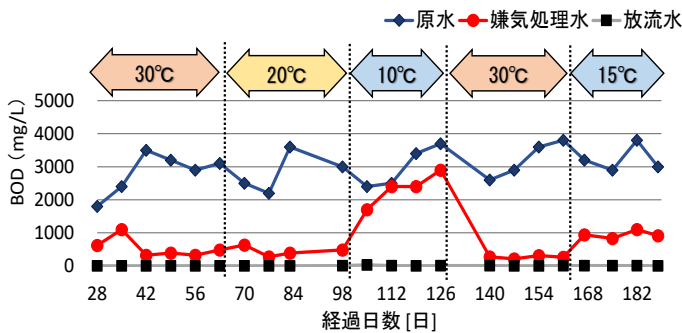


図5 原水、嫌気処理水、放流水のBODの推移

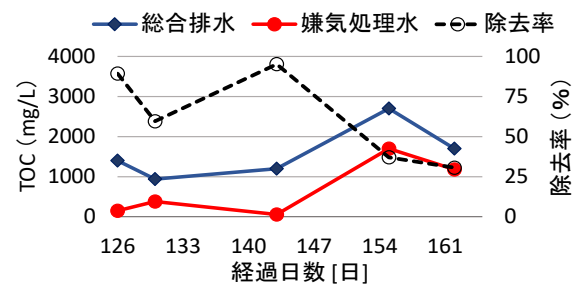


図7 総合排水、嫌気処理水のTOC及び嫌気処理水の除去率の推移（室内実験）



図6 実験装置を用いた総合排水の処理状況

このことから、TOCが3,000mg/L程度の総合排水が1週間ほど連続して嫌気処理水に流入する場合は、処理性能が低下するおそれがあるという知見を得た。

総合排水に対する嫌気処理水のTOCの除去率は、平均62% (最小31~最大95%)であったが、総合排水のTOCが1,500mg/Lより低い場合は81%であり、大豆の煮汁を用いた場合の除去率85% (水温30℃における平均値)と同程度であることが確認できた。

総合排水、嫌気処理水及び放流水のBODの推移を図8に示す。放流水のBODは、平均1.5mg/L (最小1.2~最大1.8mg/L)で推移した。嫌気処理水に対する放流水のBODの除去率は平均99.6%、総合排水に対するBODの除去率は平均99.9%であり、良好な処理水質を得た。

以上より、総合排水の負荷が高い (TOC3,000mg/L, BOD4,500mg/L程度)状態が1週間ほど継続し、嫌気処理槽の負荷が上昇した場合でも、後段の好気処理工程でカバーできるため、嫌気処理槽は一時的な負荷上昇に対し緩衝力を有していると考えられる⁹⁾。

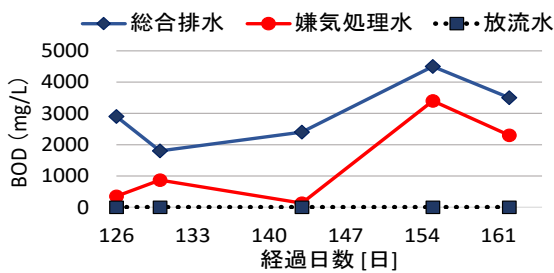


図8 総合排水、嫌気処理水、放流水のBODの推移 (室内実験)

3.2 現地実証試験

現地実証試験に先立ち実施した総合排水の水質調査の結果、表2に示すようにTOCが4,700mg/L (BOD6,800mg/L)と高濃度になる場合があり、本実験装置の嫌気処理槽に過大な負荷がかかることが想定されたため、工場の工程内対策を実施した。対策前のTOCが平均3,400mg/L, BODが平均4,800mg/Lであったところ、対策後のTOCは平均1,400mg/L, BODが平均2,900mg/Lまで負荷を削減することができた⁹⁾。

実証試験では、試験期間中に実験装置に大きなトラブルはなく安定した運転ができた。実証試験における総合排水の処理水質を表5に示す。また、総合排水、嫌気処理水及び放流水のTOC, BODの推移をそれぞれ図9, 図10に示す。

嫌気処理水のTOCは、40日までは62~760mg/Lの間で推移していたが、47日に2,000mg/Lまで急激に上昇した後、78日に280mg/Lになるまで徐々に下降し、その後は280~810mg/Lの間でほぼ横ばいに推移した。嫌気処理水のTOCの急激な上昇は、33~40日にかけて総合排水のTOCが2,500mg/L以上の濃度であ

ったことや図11に示すように、45~50日にかけてpHが6を下回っていたことから、嫌気処理槽内でメタン発酵よりも酸生成が卓越し、槽内にVFAが蓄積されたためと考えられた⁹⁾。その後、総合排水のTOCの低下に伴い嫌気処理水のTOCが徐々に下がった。12~110日間の各工程のTOCは、総合排水が平均1,610mg/L, 嫌気処理水が平均590mg/L, 放流水が平均10mg/Lであり、安定して良好な処理水質を維持した。

嫌気処理水の原水に対するTOCの除去率は、平均61% (最小4~最大96%)であり、総合排水を用いた室内実験で得られた除去率 (平均62%)とほぼ同じであった。また、放流水の原水に対するTOCの除去率は平均99.0%であった。

BODは、総合排水が平均3,910mg/L, 嫌気処理水が平均1,390mg/L, 放流水が平均1.9mg/Lであった。放流水の嫌気処理水に対するBODの除去率は平均99.8%, 原水に対するBODの除去率は平均99.9%であった。

曝気槽内のMLSSの推移を図12に示す。12~45日の間は約10,000mg/L付近で推移していたが、嫌気処理水のBODの上昇に伴い、46~61日にかけて約16,000mg/Lまで上昇し、その後は緩やかに下降し、96日以降は13,000mg/L前後で横ばいに推移した。

実証試験期間中、曝気槽は余剰汚泥の引き抜きを一度も要しなかった。このことは大豆の煮汁を用いた室内実験では得られなかった所見であり、余剰汚泥の削減の観点¹⁰⁾から興味深い特性である。

表5 実証試験における総合排水、嫌気処理水、放流水の水質

項目	総合排水	嫌気処理水	放流水
水温(℃)	18 (5~27)	20 (14~27)	14 (5~24)
pH	5.6 (4.7~8.9)	6.5 (5.2~7.4)	9.0 (8.8~9.3)
SS(mg/L)	690 (170~2,300)	53 (29~84)	<1 (<1~<1)
TOC(mg/L)	1,610 (460~2,700)	590 (62~2,000)	10 (7.7~13)
BOD(mg/L)	3,910 (830~7,000)	1,390 (210~4,200)	1.9 (0.6~5.6)

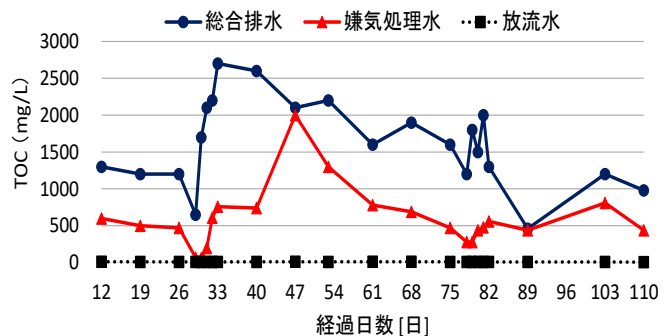


図9 総合排水、嫌気処理水、放流水のTOCの推移 (実証試験)

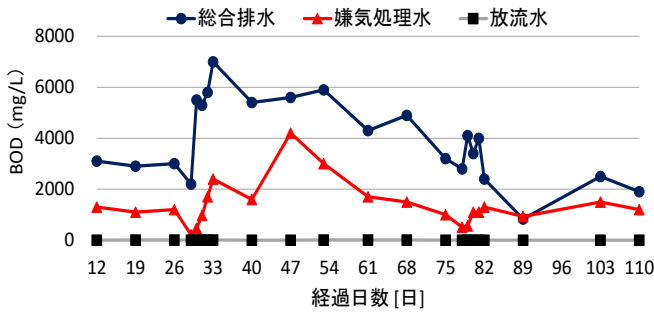


図10 総合排水、嫌気処理水、放流水のBODの推移 (実証試験)

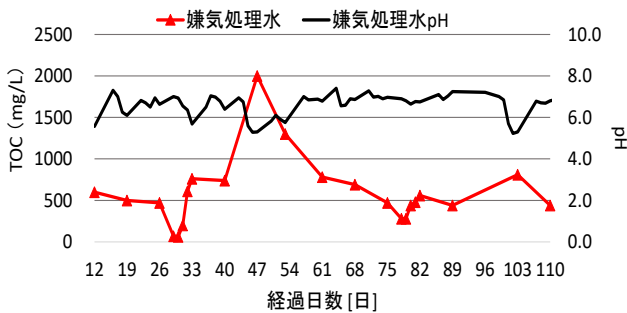


図11 嫌気処理水のTOC及びpHの推移

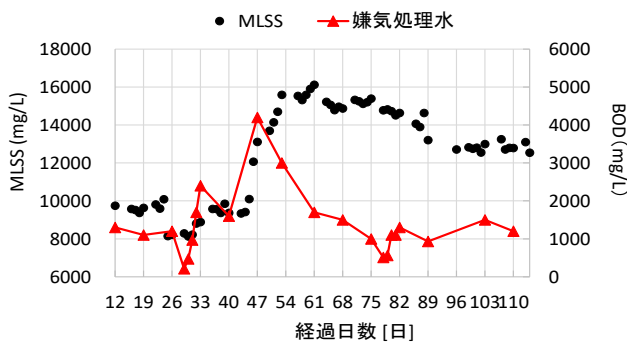


図12 嫌気処理水のBOD及び曝気槽内のMLSSの推移

4. まとめ

グラニューロ汚泥を種汚泥とする嫌気性ろ床法と膜分離活性汚泥法を組み合わせた実験装置を用いて、煮豆製造排水について処理実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 一般に食品工場排水の嫌気性処理は36℃近辺の中温発酵で行われているが、本実験では原水のCOD_Cが4,400~6,900mg/L (TOC1,300~2,200mg/L)、嫌気処理槽の水温が20℃、HRT1.5日の条件下において70%以上のCOD_C除去率が得られた。
- 2) 水温を10℃まで下げると嫌気処理水のCOD_C除去率は約30%まで低下した。

- 3) 水温が15℃より高いと嫌気処理内のVFAは1,000mg/L未満であるが、10℃では1,000mg/L以上となり、VFAの蓄積によりpHが低下する傾向がある。
- 4) 嫌気性処理における汚泥発生率は0.07kgVSS/kgCOD_Cと見積もられた。
- 5) 総合排水の負荷が高い (TOC3,000mg/L, BOD4,500mg/L程度) 状態が1週間ほど継続し、嫌気処理槽の負荷が上昇した場合でも、後段の好気処理工程でカバーできるため、嫌気処理槽は一時的な負荷上昇に対し緩衝力を有している。また、実証試験では試験期間中、曝気槽から余剰汚泥の引き抜きを要さず、余剰汚泥の削減の観点から興味深い特性が得られた。

謝辞

本研究を行うにあたり、公益財団法人かがわ産業支援財団の皆様から多くのご助言をいただきました。ここに記し、深く感謝します。

5. 引用文献

- 1) 香川県政策部統計調査課：香川県の工業—平成30年工業統計調査結果報告書—, <https://www.pref.kagawa.lg.jp/content/etc/subsite/toukei/shoko/30kogogy.shtml>
- 2) 日本規格協会：工場排水試験方法JIS K0102, 2018
- 3) 社団法人日本下水道協会：下水試験方法 (上巻) —1997年版—, 東京都千代田区大手町2-6-2, 1997
- 4) 宝月章彦, 東野宏昭：固定床式嫌気性リアクターによる澱粉製造廃水処理. 環境技術, Vol. 17, (No. 10), 672-678, 1988
- 5) 宝月章彦, 東野宏昭, 野中信一, 前田嘉通：嫌気処理における発酵温度と処理性能に関する研究. 水処理技術, Vol. 30, (No. 1), 37-43, 198
- 6) 社団法人海外環境協力センター：産業廃水処理技術移転マニュアル (総論編、基礎技術編、食品工場廃水編), 54-58, 2003
- 7) 稲森悠平, 池谷正雄, 須藤隆一：嫌気性ろ床を組み込んだ生活排水処理に及ぼす温度の影響. 下水道協会誌, Vol. 20, (No. 233), 10-17, 1983
- 8) 松重一夫, 稲森悠平, 岡田光正, 砂原広志, 須藤隆一：嫌気性ろ床法の負荷変動下における浄化特性に関する研究. 下水道協会誌, Vol. 25, (No. 293), 69-80, 1988
- 9) 岡井隆, 坂本憲治：煮豆製造業の排水特性と工程内対策による汚濁負荷の削減. 香川県環境保健研究センター所報, 18, 34-37, 2019
- 10) 平石明：活性汚泥処理における余剰汚泥減量化の生物学的原理とその応用. 用水と廃水, Vol. 44, (No. 10), 7-14, 2002