

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)

Processing Characteristics of the Treatment of Wastewater Produced by the Boiled-Beans Manufacturing Industry
Using a Wastewater Treatment Device Combining an Anaerobic Filter and a Membrane Bioreactor System (2nd Report)

岡井 隆 坂本 憲治*
Takashi OKAI Kenji SAKAMOTO

要 旨

嫌気性ろ床法を有する処理装置を用い、煮豆製造排水について、水温、HRT 等の処理条件の最適化を検討した結果、嫌気処理槽の水温が 20℃、30℃のいずれの場合でも、槽内で VFA の生成過程と分解過程が同時進行的に行われているが、水温 20℃では槽内の VFA 濃度が相対的に高く、VFA の分解過程が律速になっていること、水温 30℃では嫌気処理槽の HRT を 1.5 日から 1.0 日に短縮しても、HRT1.5 日と同等の処理性能を得ることが可能であること等の知見を得た。

Abstract

Using a wastewater treatment device with anaerobic filters, we conducted a wastewater treatment experiment at a boiled-beans production facility, and examined the optimization of treatment conditions such as water temperature and HRT. It was found that at a water temperature of 30 °C even if the HRT of the anaerobic treatment tank is shortened from 1.5 days to 1.0 day, it is possible to obtain the same treatment performance as that obtained with an HRT of 1.5 days.

キーワード：嫌気性ろ床法 揮発性有機酸 (VFA) 水理的滞留時間 (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濃度が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運転管理が容易であること等の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。これまで、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た煮豆製造排水の処理性能実験を行い、良好な処理水質が得られることを報告したところである¹⁾。今般、嫌気処理槽の処理性能に影響を与えと考えられる水温、水理的滞留時間 (HRT)、構造等について^{2), 3), 4)}、処理条件の最適化の検討を行ったので報告する。

II 方法

1 実験装置

実験に用いた排水処理装置の構成は、参考文献1)の図

1に掲げたとおりであるが、前段の嫌気処理槽については、HRT を 1.5 日から 1.0 日に短縮したものをを用いた(図1)。すなわち、有効容積 40L 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 等分または 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。

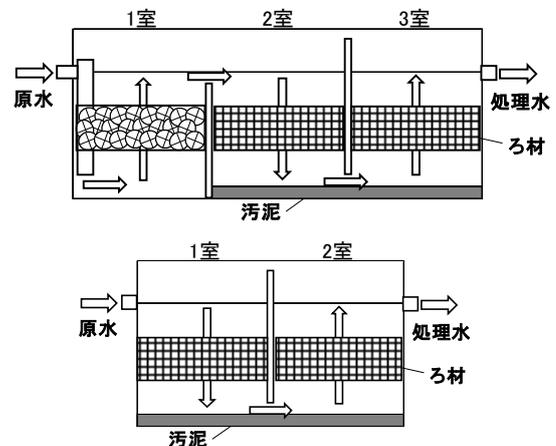


図1 排水処理装置に用いる嫌気処理槽の構造 (HRT1.0日、上段：3室構造、下段：2室構造)

*香川県東讃保健福祉事務所

接触材には、ポリプロピレン・ポリエチレン製で比表面積 $100\text{m}^2/\text{m}^3$ 、空隙率 93%を有するもの（関西化工株式会社製 MSF-50）またはポリプロピレン製で比表面積 $51\text{m}^2/\text{m}^3$ のもの（同社製 MGM-2550-P100）を用い、3室構造の場合、1室にMSF-50を2及び3室にMGM-2550-P100を、2室構造の場合、1室及び2室にMGM-2550-P100を各室の1/3の体積を占めるように中層部に充填した。

嫌気処理槽に投入する種汚泥には、他工場のUASB処理装置で用いられているグラニューール汚泥を煮豆製造排水で長期間馴養したものをを用いた。嫌気処理槽を恒温水槽内に設置し、設定温度の $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内になるように管理した。水理学的滞留時間（HRT）は、嫌気処理槽で1.0日とし、実験開始時の COD_{Cr} 負荷は $0.7\text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/(\text{kgVSS}\cdot\text{d})$ とした。

後段の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 $0.11\text{m}^2\times 2$ 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 $8,000\sim 15,000\text{mg/L}$ 程度になるよう管理した。

2 実験条件

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 $1,500\text{ mg/L}$ または $2,500\text{mg/L}$ になるように水道水で希釈して40Lとした後、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、「原水」という。）を用いた。

実験装置は、嫌気処理槽に汚泥を投入後、3週間の慣らし運転を経た後、基本的に土日祝日を除く平日に、表1の条件のとおり、嫌気処理槽の構造、水温並びに原水の負荷を段階的に変化させて実験を行った。

表1 嫌気処理槽の実験条件

| 条件 | 構造 | HRT (日) | 水温 ($^\circ\text{C}$) | 原水 TOC (mg/L) |
|----|----|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 3室 | 1.0 | 30 | 1,500 |
| 2 | | | | 2,500 |
| 3 | | | 20 | 1,500 |
| 4 | 2室 | 1.0 | 30 | 1,500 |
| 5 | | | | 2,500 |
| 6 | | | 20 | 1,500 |

水質試料は、原水調整槽から原水、嫌気処理槽の各室から嫌気処理水、放流水槽から放流水について、それぞれ週末に採取し、表1の各条件の最終週には毎日採取し、分析に供した。水質試料の分析は、pH、TOC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。

III 結果と考察

1 嫌気処理工程の COD_{Cr} 除去性能

表1に示した条件で排水処理装置を運転し、処理水質が安定した後に得た試料について、 COD_{Cr} 及び原水に対する嫌気処理水の COD_{Cr} 除去率を表2に示す。また、比較のため、これまでに得られた実験結果と合わせて条件ごとの COD_{Cr} 除去率のグラフを図2に示す。

嫌気処理槽の水温が 30°C で3室構造の場合、原水と嫌気処理水の COD_{Cr} （平均値）は、条件1では、原水が $4,770\text{mg/L}$ のとき嫌気処理水は 780mg/L となり、 COD_{Cr} 除去率（平均値）は84%（変動幅3%）となった。なお、

表2 原水及び嫌気処理水の COD_{Cr} 及び除去率

単位： mg/L

| 条件 | 嫌気処理槽 構造 | 嫌気処理槽 水温 ($^\circ\text{C}$) | 原水 | 嫌気処理水 | | | |
|----|-------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| | | | | 1室 | 2室 | 3室 | 除去率 |
| 1 | 3室 | 30 | 4,770 (4,200~5,300) | 3,230 (2,700~4,100) | 1,770 (1,400~2,100) | 780 (770~790) | 84% (82~85%) |
| 2 | | | 9,100 (8,100~9,900) | 7,100 (6,900~7,200) | 3,600 (2,100~5,300) | 1,900 (1,600~2,200) | 79% (76~81%) |
| 3 | | | 5,300 (5,300~5,300) | 4,470 (4,000~5,000) | 4,000 (3,100~4,600) | 3,670 (2,400~4,700) | 31% (11~55%) |
| 4 | 2室 | 30 | 4,900 (4,300~5,500) | 2,300 (1,900~3,000) | 1,600 (1,200~2,200) | — | 67% (55~75%) |
| 5 | | | 8,230 (8,200~8,300) | 4,770 (3,900~5,600) | 2,370 (2,000~3,000) | — | 71% (64~76%) |
| 6 | | | 4,850 (4,500~5,400) | 3,830 (3,800~3,900) | 3,200 (3,000~3,500) | — | 33% (22~44%) |

表中、上段は平均値、括弧内は最小値~最大値。日間変動値を含まない。

HRTが1.5日であること以外は条件1と同じ条件で実験した場合のCOD_{Cr}除去率は73%であった。条件2では、原水9,100mg/Lのとき嫌気処理水は1,900mg/L、COD_{Cr}除去率は79%（変動幅5%）となった。嫌気処理槽の水温が30℃で2室構造の場合、条件4では、原水が4,900mg/Lの場合、嫌気処理水は1,600mg/L、COD_{Cr}除去率67%（変動幅20%）であり、条件5では、原水8,230mg/Lのとき嫌気処理水は2,370mg/L、COD_{Cr}除去率71%（変動幅12%）となった。

以上の結果から、今回の実験条件では、嫌気処理槽の構造が2室構造と3室構造の場合を比較すると、3室構造の方がCOD_{Cr}除去率の変動幅はやや小さいものの、構造や原水の濃度の違いによりCOD_{Cr}の除去性能に大きな差は見られなかった。また、水温30℃では、HRTを1.0日にしてもHRT1.5日の場合と同等の除去性能が得られることが分かった。

次に、嫌気処理槽の水温が20℃の場合、3室構造（条件3）では、原水と嫌気処理水のCOD_{Cr}（平均値）は、原水が5,300mg/L、嫌気処理水が3,670mg/Lとなり、COD_{Cr}除去率（平均値）は31%となった。2室構造（条件6）では、原水4,850mg/L、嫌気処理水が3,200mg/L、COD_{Cr}除去率は33%となった。なお、HRTが1.5日で嫌気処理槽が3室構造の場合のCOD_{Cr}除去率（平均値）は、水温20℃で74%、30℃で73%であり、水温の違いによる除去率の差は認められない。

以上の結果から、HRT1.0日では、嫌気処理槽の水温が20℃と30℃の条件ではCOD_{Cr}除去率に大きな違いがあり、水温が処理性能に与える影響が大きいことが分かるが、水温を20℃にした場合でも、HRTを長くすることにより除去率を向上させることが可能であることを見出した。

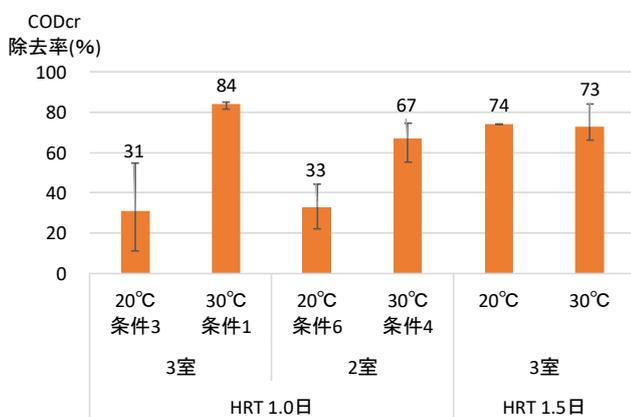


図2 嫌気処理水のCOD_{Cr}除去率（原水TOC約1,500mg/L）

2 嫌気処理工程におけるVFAの挙動

嫌気性消化の酸生成相に関与する細菌種は、温度により低温菌（20℃以下）、中温菌（20～40℃）、高温菌（45℃以上）に分類され、酸生成菌においては、中温菌の代謝活性が高温菌のそれよりも高いこと、酸生成菌の基質消費及び増殖の活性に対するpHの影響は、5前後のpH以下において顕著であると言われており、中性付近のpHにおいては、菌体の増殖収率が高まることによって菌体濃度が高く、基質の消費量及び発酵生産される総有機酸量が多いことが知られている^{5), 6)}。

今回の実験において、嫌気処理槽の1室のpHは実験期間中5以上に維持され、また、水温が20℃または30℃の条件下で行っていることから、嫌気処理槽では酸生成が促進される条件下であると考えられる。また、COD_{Cr}はVFA濃度と連動して増減し、高い相関を有することから、嫌気処理槽の各室で試料を採取し、双方の挙動を調べることにより、酸生成過程とそれに続くVFAの分解過程の状況を把握することができると考えられる。

条件1（30℃, 3室構造）において処理工程別に採取した試料のVFA濃度及びCOD_{Cr}の推移をそれぞれ図3、図4に示す。

VFA濃度についてみると、日間変動値を含む平均値は、原水が350 mg/L、嫌気処理槽1室が1,220mg/L、2室が490mg/L、3室が70mg/Lであり、嫌気処理槽1室で急増した後、2室、3室と工程が進むに従って濃度は減少する。一方、COD_{Cr}は原水で4,740 mg/L、嫌気処理槽1室が3,140mg/L、2室が1,650mg/L、3室が750mg/Lであり、原水が最も高く、嫌気処理の工程が進むにつれて減少する。嫌気処理工程におけるCOD_{Cr}の推移は、VFA濃度の増減に呼応して変動していることが図3、図4のグラフから見てとれる。

嫌気処理工程におけるVFA及びCOD_{Cr}の日間変動の推移をみると、週明けの月曜日（28日）にVFA、COD_{Cr}ともに濃度が低くなるが、日数の経過に伴いいずれも上昇し、金曜日（32日）には減少に転じた。月曜日にVFA濃度及びCOD_{Cr}が低くなるのは、土日には嫌気処理槽に原水の流入がないため、この期間に槽内で酸生成とVFAの分解が進んだことによると考えられる。なお、条件4（30℃, 2室構造）におけるVFA及びCOD_{Cr}の日間変動についても、上記と同様の傾向を示した。

また、月曜日の3室のVFAが24mg/L、COD_{Cr}が430mg/Lであり、この条件での実験期間中では最も低い濃度とな

ったが、試料の採取までに酸生成及びVFAの分解は相当程度進んでいると考えられることから、本処理方式を用いた煮豆製造排水の嫌気性処理では、原水COD_{Cr}の9割除去が実用的な処理能力の限界であると考えられる。

以上のことから、水温30°Cのとき、嫌気処理槽では、酸生成過程とVFAの分解過程が同時進行的に行われており、2室、3室と処理工程が進むにつれVFA及びCOD_{Cr}の濃度がともに減少し、処理が進んでいると考えられる。また、処理工程が進むとCOD_{Cr}の日間変動幅が小さくなることから、後段の好気処理工程における安定的な水処理に寄与するものと思われる。

次に、条件6(20°C, 2室構造)における処理工程別のVFA濃度及びCOD_{Cr}の推移をそれぞれ図5、図6に示す。

日間変動値を含むVFAの平均値は、嫌気処理槽1室が1,460mg/L、2室が1,220mg/Lとなり、水温30°Cの場合(条件4: 1室640mg/L、2室360mg/L)よりも高くなった。また、COD_{Cr}の平均値は、嫌気処理槽1室が3,650mg/L、2室が2,950mg/L(COD_{Cr}除去率平均40%)となり、水温30°Cの場合(条件4: 1室2,120mg/L、2室1,370mg/L(除去率平均70%))と比較して濃度が高くなった。なお、条件3(20°C, 3室構造)における日間変動値を含むVFAの

平均値は、嫌気処理槽1室が1,550mg/L、3室が1,280mg/Lであり、水温30°Cの場合(条件1: 1室1,220mg/L、3室70mg/L)よりも高くなった。このように、水温20°Cでは特に嫌気処理槽1室のVFAの濃度が上昇するが、pHは6以上に維持されており、いわゆる酸敗現象^{7), 8)}による処理の阻害は見られなかった。

嫌気処理槽の水温を20°Cに設定した場合について、条件3(3室構造, HRT1.0日)、条件6(2室構造, HRT1.0日)及び条件A(3室構造, HRT1.5日)の嫌気処理槽の各槽のHRTを横軸にVFA濃度の平均値またはCOD_{Cr}の平均値(ともに日間変動を含まない)を縦軸にプロットしたグラフをそれぞれ図7、図8に示す。

条件3における各室のHRTは、1室が0.33日、2室が0.67日、3室が1.0日となり、条件6は、1室が0.5日、2室が1.0日に相当する。VFAについて、条件3と条件6の挙動を比較すると、原水では両者ともに500mg/L未満であったが、1室で1,000~1,900mg/Lまで上昇した後、HRTが長くなるにつれて減少し、HRT1.0日の平均値は条件3が1,130mg/L、条件6が1,380mg/Lとなった。条件Aでは、HRT1.0日のVFAは1,050mg/Lと条件3と同等の濃

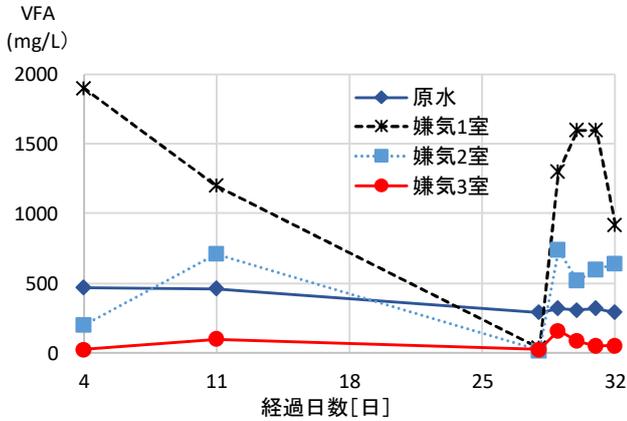


図3 処理工程別のVFA濃度の推移(条件1)

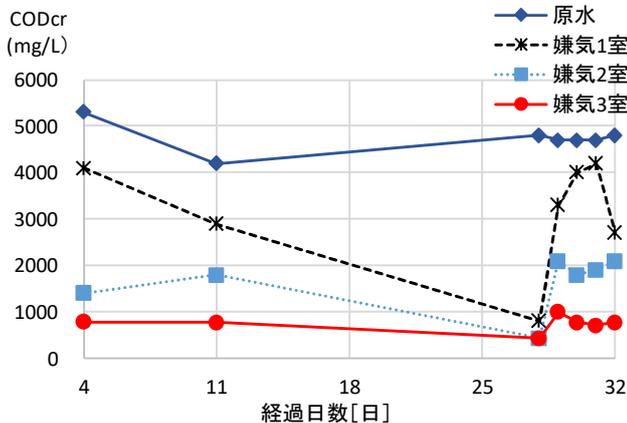


図4 処理工程別のCOD_{Cr}の推移(条件1)

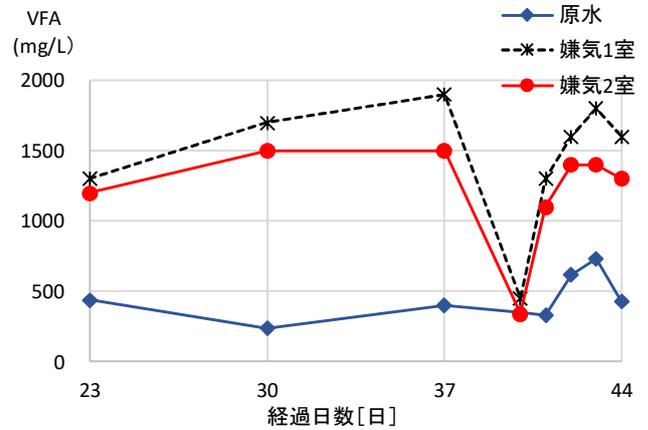


図5 処理工程別のVFA濃度の推移(条件6)

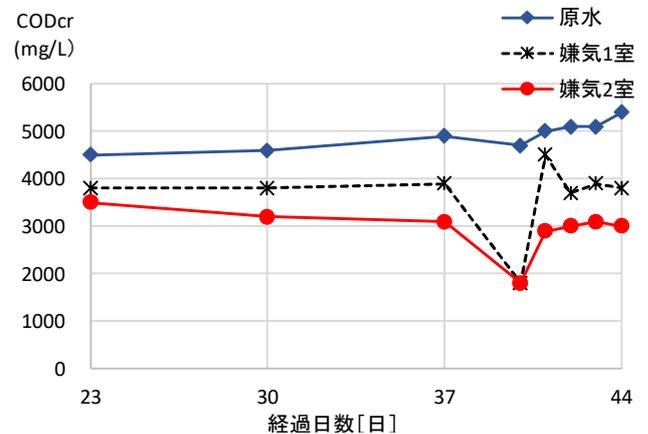


図6 処理工程別のCOD_{Cr}の推移(条件6)

度となり、HRT1.5日では320mg/Lまで減少した。一方、COD_{Cr}はHRTの延長に伴いほぼ直線的に減少した。条件Aでは、HRT1.0日のCOD_{Cr}は2,850mg/Lであり条件3及び条件6とほぼ同じ濃度であるが、HRT1.5日では1,300mg/Lまで減少した。

以上の結果から、嫌気処理槽の水温が20°Cの条件では、HRT1.0日では資化されていないVFAが残存しており、VFAの分解過程が律速になるが、HRTを長くすることでVFAの分解が進み、COD_{Cr}が減少したと考えられる。

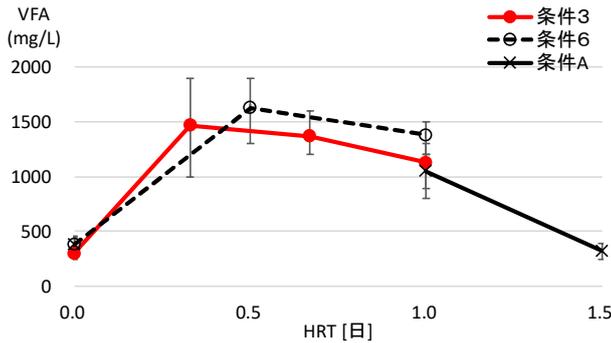


図7 嫌気処理槽の各室のVFA (原水TOC約1,500mg/L)

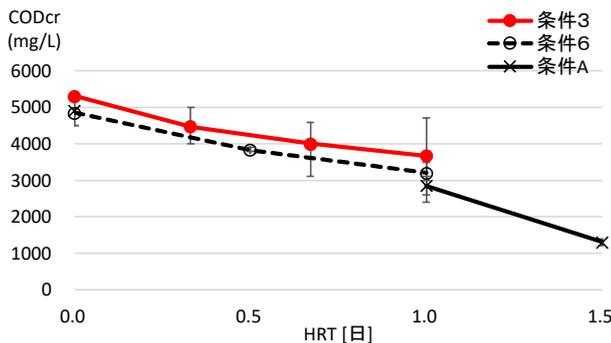


図8 嫌気処理槽の各室のCOD_{Cr} (原水TOC約1,500mg/L)

3 好気処理工程のTOC除去性能

条件1~6で得られた原水、嫌気処理水、放流水のTOC及び除去率を表3に示す。上述したとおり、嫌気処理工程の処理性能は水温とHRTの影響を大きく受けるが、HRT1.0日の場合、嫌気処理工程のTOC除去率は、水温30°Cで約80%、水温20°Cでは約37%となった。

嫌気処理水は後段の好気処理工程で処理され、条件1~6について、放流水のTOCの平均値は32~60mg/L、除去率は97~98%となり、処理水質は良好であった。

IV まとめ

嫌気性処理において、嫌気処理槽の構造、水温、HRTが処理性能に与える影響について、煮豆製造排水を用いて処理実験を行い、処理条件の最適化を検討した。

嫌気処理槽のHRTを1.0日とし、水温が20°Cまたは30°Cの条件における処理性能として、以下の知見を得た。

- 1) 嫌気処理槽の水温が20°CにおけるCOD_{Cr}除去率の平均値が約30%であったのに対し、30°Cでは67~84%と高い除去率となったことから、水温が処理性能に与える影響は大きい。
- 2) 嫌気処理槽のHRTを1.5日から1.0日に短縮しても、水温を30°Cに上げることで、HRT1.5日と同等の処理性能を得ることが可能である。
- 3) 嫌気処理槽の水温が20°C、30°Cのいずれの場合でも、槽内でVFAの生成過程とVFAの分解過程が同時進行的に行われているが、水温20°Cでは、30°Cの場合よりも嫌気処理槽各室のVFA濃度が高くなり、VFAの分解過程が律速になっている。

表3 原水、嫌気処理水及び放流水のTOC及び除去率

単位: mg/L

| 条件 | 嫌気処理槽構造 | 嫌気処理槽水温 (°C) | 原水 | 嫌気処理水 | | 放流水 | |
|----|---------|--------------|------------------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | | | | | 除去率 | | 除去率 |
| 1 | 3室 | 30 | 1,400 (1,300~1,500) | 280 (120~570) | 80% (59~92%) | 32 (30~35) | 98% (98%) |
| 2 | | | 2,600 (2,400~2,700) | 430 (350~480) | 84% (82~85%) | 46 (39~52) | 98% (98%) |
| 3 | | 20 | 1,430 (1,400~1,500) | 910 (550~1,200) | 36% (14~63%) | 38 (29~52) | 97% (96~98%) |
| 4 | 2室 | 30 | 1,470 (1,300~1,600) | 340 (220~540) | 77% (64~84%) | 39 (36~43) | 97% (97~98%) |
| 5 | | | 2,430 (2,200~2,600) | 490 (380~700) | 80% (73~85%) | 60 (53~69) | 98% (97~98%) |
| 6 | | 20 | 1,400 (1,400) | 880 (690~1,000) | 37% (29~51%) | 47 (41~54) | 97% (96~97%) |

表中、上段は平均値、括弧内は最小値~最大値。日間変動値を含まない。

- 4) 嫌気処理槽の水温が20°Cの場合でも、HRTを1.5日にすることで、VFAの分解速度の低下をカバーし、COD_{cr}除去率が向上する。

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, 8(2), 16-21(2020)
- 2) 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, 20(233), 10-17(1983)
- 3) 稲森悠平, 松尾一夫, 菊池寿一, 岩佐克彦, 須藤隆一:嫌気性ろ床法の浄化特性に及ぼす負荷変動の影響, 国立公害研究所研究報告, (118), 167-189(1988)
- 4) 松尾一夫, 稲森悠平, 須藤隆一, 砂原広志:嫌気性ろ床法の処理能に及ぼす有機物濃度の影響, 用水と廃水, 32(12), 39-43(1990)
- 5) 遠藤銀朗, 野池達也, 松本順一郎:嫌気性消化の酸生成相に及ぼす温度とpHの影響, 土木学論文報告集, 第330号, 49-57(1983)
- 6) 松永旭:揮発性有機酸のメタン発酵におけるpH依存性, 用水と廃水, 39(11), 27-33(1997)
- 7) 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)
- 8) 須藤隆一:水環境保全のための生物学, 産業用水調査会, 170-173(2004)