

パイル担体活性汚泥法による余剰汚泥の減容化

立命館大学理工学部 教授 惣田訓

1. はじめに

下水処理方法の主流である活性汚泥法では、その処理過程で微生物の塊である余剰汚泥が発生し、その処理やリサイクルには、多大な費用とエネルギーが必要とされている。その解決策として、曝気槽にパイル担体（図 1）を浸漬し、通常は活性汚泥中に発生しにくい貧毛類（水生ミミズ）を食物連鎖の最上位者として保持し、余剰汚泥を減容化する方法（パイル担体活性汚泥法）が提案されている。しかし、その安定的な運用方法はまだ解明されていない。

和歌山県工業技術センターは、梅加工場の排水を処理する活性汚泥法の曝気槽にアクリル製パイル織物を浸漬したところ、付着した汚泥とともに微小動物の一種である貧毛類（水生ミミズ）が高密度の群集を形成し、余剰汚泥の発生量が、1 年目は 30%、2 年目は 50%、3 年目は 83%にまで減少する成果を挙げ、これをパイル担体活性汚泥法 ESCAPE（Excess Sludge reduction system using Carriers based on Acrylic Pile fabrics）と命名した（山際ら, 2013; 山際, 2017）。アクリル繊維である起毛（パイル）部分の表面には細菌が、ポリエスエル繊維である生地（ベース）部分には貧毛類が、多量に付着し、適度な揺動によって、餌となる細菌が貧毛類に連続供給される立体構造が汚泥減容化に適しているとされている（山際ら, 2013; 山際, 2017）。曝気槽内のパイル担体には、貧毛類群集が（ $479 \sim 690$ ） $\times 10^4$ 個体/ m^2 の密度で付着し、ウスベニイトミミズ（*Monopylephorus rubroniveus*）、ユリミミズ（*Limnodrilus hoffmeisteri*）、ミナミミズミミズ（*Allonais inaequalis*）、シロヒメミミズ（*Enchytraeus albidus*）の 4 種の存在が確認されており、特にウスベニイトミミズ（図 2）が優占していることが報告されている（大高ら, 2021）。ウスベニイトミミズは、海水でも淡水でも生存でき、塩分濃度が変動する梅加工場の排水中での生存に適していると推測されている 7）。

これまでの研究（惣田ら, 2021）では、活性汚泥の小型連続装置を用い、Run1~Run8 は低負荷（140 mg-C/L $\cdot$ d）、Run9~Run15 は高負荷（420 mg-C/L $\cdot$ d）で実証実験を行った。汚泥収率は、低負荷の場合、貧毛類を導入した試験系は-2.45~-1.45 gVS/gTOC、貧毛類を導入していない対照系は-1.50~-0.28 gVS/gTOC となり、余剰汚泥は発生しなかった。高負荷の場合、試験系は 0.07~0.56g VS/gTOC、対照系は 0.31~0.62 gVS/gTOC となり、理論典型値 1.46 gVS/gTOC（Henze et al., 2006）より低く、汚泥の減容化効果が得られた。しかし、Run15 終了後、活性汚泥から貧毛類が全滅してしまった。本研究では、貧毛類の継代培養方法の確立と生態調査を目的とした平板培地での実験と、中負荷（290 mg-C/L $\cdot$ d）条件での汚泥発生抑制効果の検証を実施した。

2. 実験方法

2-1 平板培地による貧毛類の継代培養

1%の寒天を含む生理的塩類溶液（NaCl 3.5 g/L、KCl 0.05 g/L、CaCl₂ 0.05 g/L、NaHCO₃ 0.2 g/L、寒天 10.0 g/L）（野呂ら, 2014）を元に、塩分濃度が 1 倍(0.35%)、2 倍(0.7%)、5 倍(1.75%)、7 倍(2.45%)、10 倍(3.5%)の 5 種類の平板培地 20 mL を各 2 つずつ作成し、貧毛類の産卵、孵化、成長を観察した。産卵観察にはウスベニイトミミズを 10 匹と活性汚泥 2.0g を、孵化観察にはウスベニイトミミズのコクーン 10 個を各平板培地に添加した。孵化観察が終了後、活性汚泥を 2.0 g 平板培地に添加して、成長観察に移行した。全ての平板培地は、室温 25 ℃の暗所に静置し、毎日観察を行った。



図1 RFV-52295(株) オーヤパイル)のパイル織物.



図2 ウスベニトミミズ.

2-2 パイル担体活性汚泥法による余剰汚泥減容化の連続式ラボスケール実験

曝気槽(5L)と沈殿槽(2L)で構成される連続式活性汚泥減容化リアクターを2台用いた(図3)。1台の曝気槽には、パイル担体(RFV-52298、(株)オーヤパイル、 $7.5 \times 25.5\text{cm}$ 、244g)を浸漬し、下水処理場の試験装置から採取した貧毛類(主にウスベニトミミズ)を付着させ、試験系とした(図4)。同様にパイル担体を設置した、もう1台の装置には貧毛類は付着させずに対照系とした。水温 $18 \sim 23^\circ\text{C}$ 、溶存酸素 $2 \sim 3\text{mg/L}$ 、返送汚泥比2.0に設定し、合成下水を滞留時間12時間で処理した。合成下水の組成は、カツオ肉エキス(和光純薬工業株式会社) 400 mg/L 、ハイポリペプトン(富士フイルム和光純薬株式会社) 600 mg/L 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 83.6 mg/L 、 KH_2PO_4 13.6 mg/L 、 NaCl 15 mg/L 、 KCl 7 mg/L 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 10.25 mg/L 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 9.27 mg/L とした。物質収支を計算する便宜上、余剰汚泥の引き抜きをせずに14～21日間の運転を行った後、系内の全汚泥を回収して定量した。汚泥を入れ替え、実験を16回繰り返した(Run16～Run31)。

槽内温度と処理水量を毎日記録し、光学式 MLSS 計 (ML-30N, 笠原理化工業(株)) を用いて曝気槽内の MLSS 濃度を測定した。また、2,3 日おきに、処理水 SS (Suspended Solids, 浮遊物質濃度) と TOC 濃度の測定を行った。14 日ごとの汚泥入れ替えの際には、投入汚泥とリアクター内の汚泥の MLSS、MLVSS、TOC 濃度の測定および担体湿重量を測定した。ろ過した処理水の TOC を (TOC-5000A (株) 島津製造所) で測定した。MLSS、MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, 活性汚泥有機性浮遊物質濃度) は、各 Run の最終日以外の日には光学式 MLSS 計で数値を測り、最終日は連続式活性汚泥減容化リアクターの曝気槽と沈殿槽の汚泥をすべて引き出し、混ぜた後、下水試

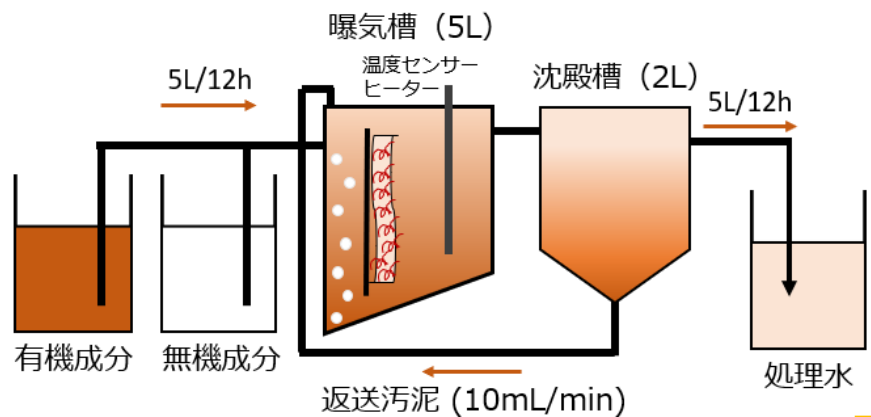


図3 連続式活性汚泥減容化リアクター。

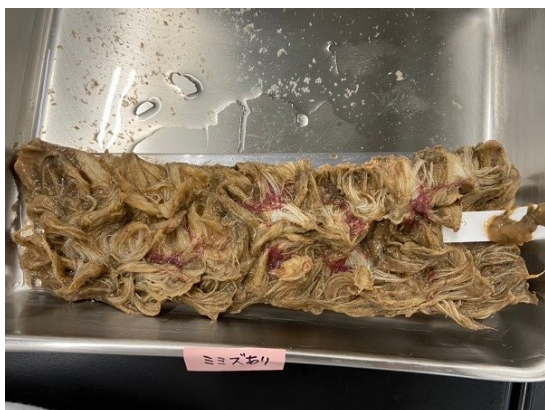


図4 パイル担体（試験系），右）パイル担体（対照系）。

験法 JISK0102 に準じた重量法で測定した。貧毛類の推定生存重量は、まず各 Run の最終日に、パイル担体をリアクターから引き出し、1 時間静置させ、水を切った後に電子天秤で重量を測定した。そして、担体から剥離した貧毛類をリアクター内から回収し、担体に付着させた後の重量を測定した。その結果を用いて、貧毛類の推定生存量（g-湿重量）を算出した。

物質収支は、活性汚泥モデル ASM3C では、典型値として、細菌細胞に摂取された有機物は、細胞内の貯蔵物質に収率 0.91gTOC/gTOC で変換され、さらに収率 0.67 gTOC/gTOC で細胞に変換され、細菌細胞の炭素量から VS (volatile solids) 量への換算値は 2.4 gVS/gTOC である (Henze et al., 2006)。これより、除去された単位 TOC 質量当たりの理論汚泥収率の典型値を 1.46 gVS/gTOC とした。曝気槽の中の微生物が自己分解を行い、食物連鎖によって、実際の収率は理想値より小さくなる。汚泥の除去率を把握するため、各 Run の収率を計算した。

$$\text{収率} = \frac{\text{最終汚泥量(gVSS)} + \text{流出汚泥量(gVSS)} - \text{初期汚泥量(gVSS)}}{\text{除去 TOC(g - C)}}$$

3. 結果と考察

3-1 平板培地による貧毛類の培養

試験系の担体に付着させた貧毛類は、Run16 と Run18 と Run22 においてわずかに減少したことを除き、ウスベニイトミミズの産卵、孵化および成長に適した塩分は異なった (図 5)。卵包の産卵には、0.35%まで塩分が低いほど適していた。塩分 2.45%以下なら幼生は孵化できた。塩分 1.75%が幼生の成長に最適であった。産卵観察において、海水と同程度の塩分濃度 3.5%の平板培地でも、産卵数が最も少なかったものの、ウスベニイトミミズの成体自体は生存し続けた。

3-2 連続式活性汚泥装置による余剰汚泥の減容化の検証

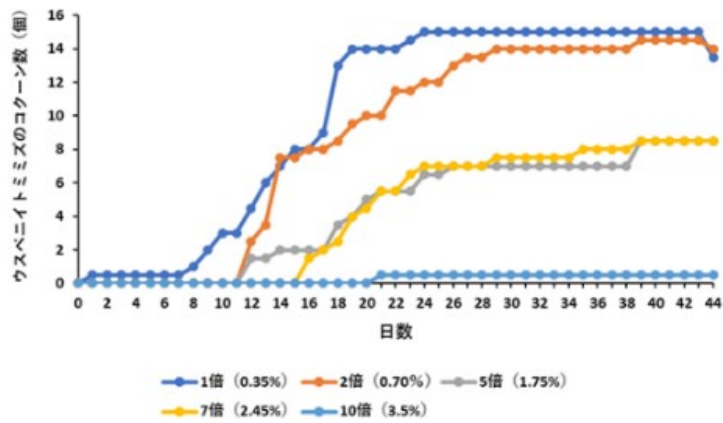
試験系の担体に付着させた貧毛類は、Run16 と Run18 と Run22 においてわずかに減少したことを除き、曝気槽内で良好に生存した (図 6, 7)。また、汚泥中に沈殿した状態では生存していることも多く、パイル担体から剥離した貧毛類は、多い場合は 15g-wet 程度であった。前回の Run で剥離した貧毛類も回収して付着させているため、各 Run の 0 日目の担体表面には、いわゆるミミズ玉が局在した状態であったが、各 Run の最終日には、担体内部のペース部に潜り込むようにして貧毛類は分布していた。

MLSS 濃度(図 8)は、初日に比べ、14 日目の方が高くなり、全体的に試験系の方がわずかに高かった。しかし、Run24~Run27 の期間は、試験系の 14 日目の MLSS 濃度が著しく低下した。

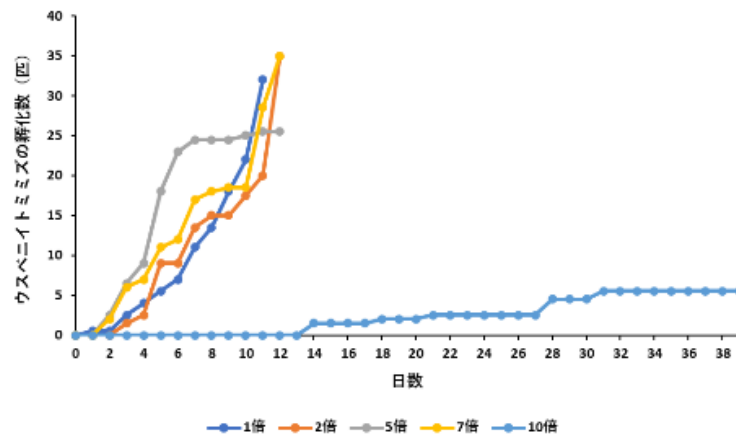
両系の処理水の TOC は、既往研究 (惣田ら, 2021) の倍近い濃度である 40~50 mg/L となり、有機物除去は不調であった (図 9)。さらに貧毛類の存在によって、有機物の除去にはある程度の悪影響があったと考えられる。

図 10 に示すように中負荷条件である本研究の汚泥収率は、試験系は 0.07~1.25 gVS/gTOC、対照系は 0.44~1.25 gVS/gTOC となった。この結果は、余剰汚泥が発生したが、汚泥収率が理論典型値より低く汚泥が除去されていることが分かる。すなわち、貧毛類の導入によって汚泥が減容化されていることが考えられる。しかし、既往研究の高負荷条件よりも高い数値となり、活性汚泥による有機物除去が不調であったことが、その一因と考えられる。

A



B



C

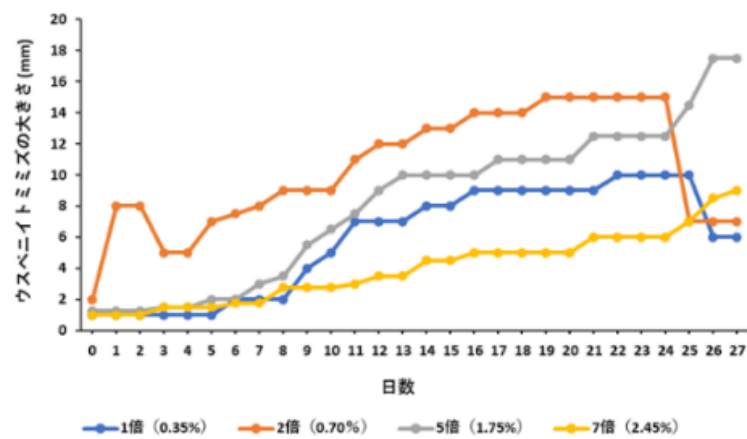


図5 平板培地の各観察結果. (A) 産卵観察、(B) 孵化観察、(C) 成長観察.

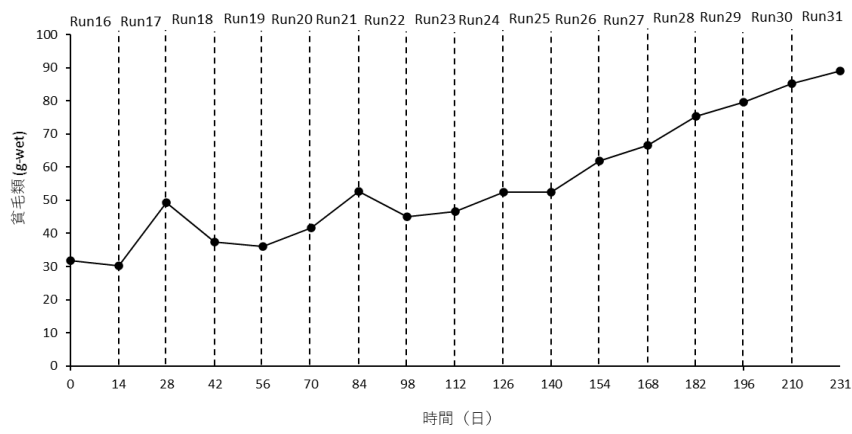


図6 パイル担体活性汚泥法の貧毛類の生存重量.

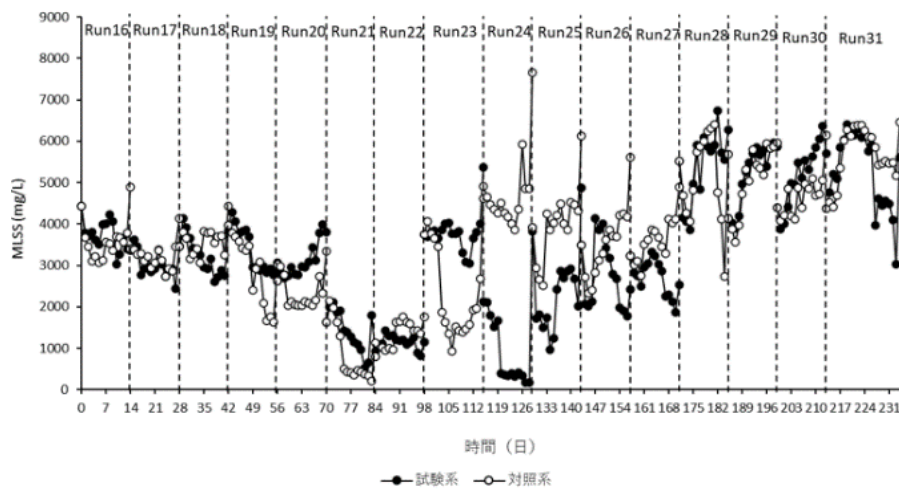


図8 パイル担体活性汚泥法の MLSS 濃度.

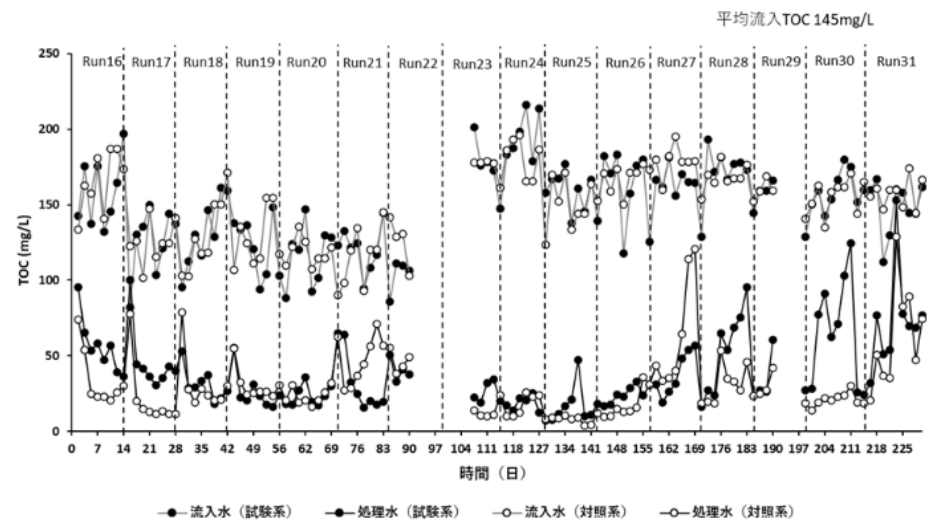


図9 パイル担体活性汚泥法の TOC 濃度.

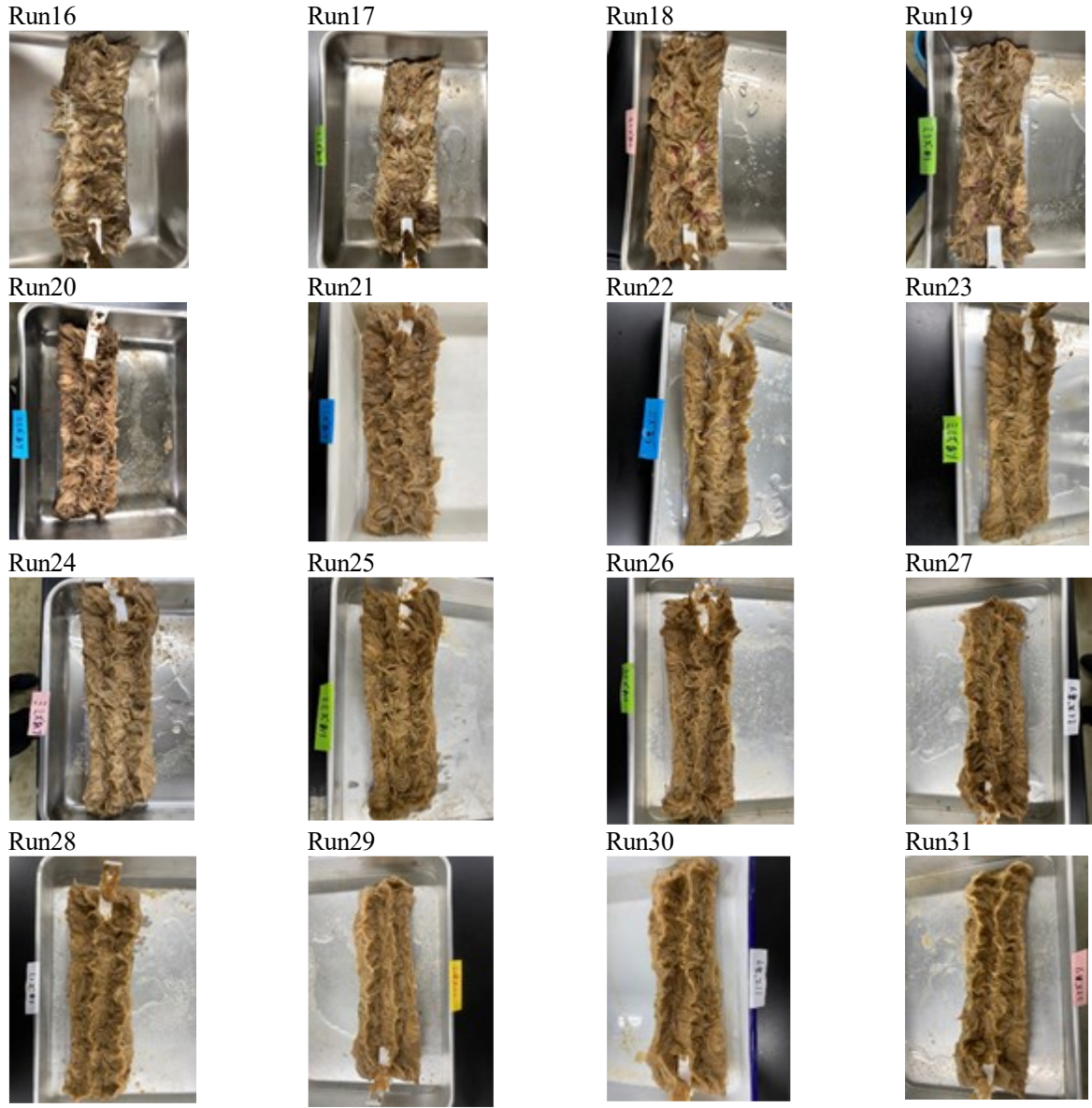


図 7 各 Run の貧毛類が付着したパイル担体

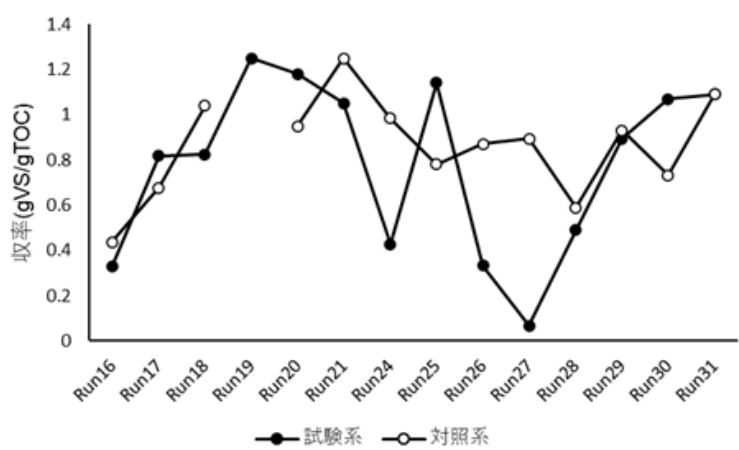


図 10 各 Run の汚泥収率.

4. 結論

平板培地による貧毛類の継代培養では、ウスベニイトミミズの産卵環境、孵化環境および成長環境に適した塩分濃度がそれぞれ違うことが分かった。まず、ウスベニイトミミズの産卵は、塩分濃度が低い環境ほど適しており、孵化は塩分濃度が 7 倍 (2.45%) 以下の環境が適しており、成長は、塩分濃度が 5 倍 (1.75 倍) の環境が最適であった。また、産卵観察の塩分濃度 10 倍 (3.5 倍) の平板培地では、ウスベニイトミミズが 30 日以上生存していたため、塩分濃度が海水と同じ環境下でも生存することができると考えられる。しかし、食物連鎖を利用した活性汚泥法の安定的な運用には、ウスベニイトミミズの更なる生態調査が必要と考えるため、継続して観察試験を行うことが必要である。

連続式ラボスケール実験では、14 日ごとの MLSS 濃度、TOC 濃度、処理水 SS などの数値を計算して、貧毛類による余剰汚泥の減容化効果の分析を行った。両系の TOC の除去率は 70%以上になり、物質収支の収率が、実験データが欠損の Run を除いて、試験系の収率は 0.07~1.25 gVS/gTOC、対象系は 0.44~1.82 となった。さらに、試験系は理論汚泥収率の典型値 1.46 gVS/gTOC より低くなった。処理水 SS の数値においては、多くの Run で汚泥が処理水 SS として流出したので、全体的の SS 数値が高くなった。この原因としては、貧毛類の摂食によって、汚泥を細分化し、沈殿しにくくなったことが考えられる。よって、今後の研究では汚泥が流出させないための工夫を考える必要がある。また、今回の研究で、貧毛類の導入による処理水の水質が悪くなることもなく、貧毛類は約 224 日間連続式活性汚泥リアクターの曝気槽内で、生存し、繁殖していた。これからの研究では、貧毛類を多種類の塩分濃度の環境で培養、限界値と最適な塩分濃度などの解明が必要だと考えている。

参考文献

- 惣田訓, 前川愛実, 鍛冶龍馬, 松山怜愛, 赤木知裕, 山際秀誠 (2021) 小型連続式装置を用いたパイル担体活性汚泥法 (ESCAPE) による余剰汚泥の発生抑制効果の検証. 日本水処理生物学会誌, 57, 43-53.
- 高明史, 鳥居高明, 赤木知裕, 山際秀誠: 梅加工場で発生する高塩分の排水処理に寄与する水生貧毛類の組成と塩分耐性. 日本水処理生物学会誌, 57, 23-33 (2021)
- 野呂佳代子, 伊藤 孝, 加瀬榛香, 山口智也: ヤマトヒメミミズ幹細胞システムを活用した環境重金属バイオセンサー開発. 日本大学生産工学部研究報告 A, 47 (2), 15-22 (2014)
- 山際秀誠, 解野誠司, 高辻 渉, 大家健司, 中田祐史: 小規模事業者向け排水処理設備の商品開発. 月刊「せんい」, 66, 71-75 (2013)
- 山際秀誠: 梅加工場排水処理における汚泥減容化技術の開発. 環境管理, 53 (8), 40-45 (2017)
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht, M.: Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Publishing, London (2006)