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

Performance of Excess Sludge Reduction System Using Carriers Based on Acrylic Pile Fabrics (ESCAPE) in Laboratory Continuous Activated Sludge Reactors

惣田 訓^{1*}、前川愛実¹、鍛冶龍馬¹、松山怜愛¹、赤木知裕²、山際秀誠²

¹立命館大学理工学部／〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

²和歌山県工業技術センター／〒649-6261 和歌山県和歌山市小倉60

SATOSHI SODA¹, MANAMI MAEKAWA¹, RYOMA KAJI¹, REINA MATSUYAMA¹,
TOMOHIRO AKAGI², and YOSHINOBU YAMAGIWA²

¹College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
/1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

²Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture
/60 Ogura, Wakayama, Wakayama 649-6261, Japan

Abstract

To assess the performance of an Excess Sludge reduction system using Carriers based on Acrylic Pile fabrics (ESCAPE) process, synthetic wastewater was treated using lab-scale continuous-flow activated sludge reactors. Bacteria and oligochaetes were presumed to settle on the pile carriers, thereby reducing excess sludge in the food chain. Each reactor consisted of an aeration tank (5 L) equipped with the pile carrier (3 cm pile length, 35/cm² density, 7.5 × 25.5 cm) and a settling tank (2 L). A control reactor and a test reactor were, respectively, uninoculated and inoculated with oligochaetes (50 g-wet). A 14-day operation period was repeated 13 times in all to evaluate the mass balance in the reactors. In eight operation runs at a low loading rate of 140 mgTOC/L·d, the net sludge reduction occurred with observed yield of -1.50 to -0.28 gVS/gTOC for the control reactor and -2.45 to -1.45 gVS/gTOC for the test reactor. In five operation runs at a high loading rate of 420 mgTOC/L·d, low excess sludge production occurred with observed yield of 0.31-0.62 gVS/gTOC for the control reactor and 0.07-0.56 gVS/gTOC for the test reactor, which were only 4-42% of the typical theoretical sludge yield of 1.46 gVS/gTOC. The test reactor removed organic matter from synthetic wastewater effectively with no negative influence on the effluent quality by introduction of the oligochaetes. *Monopylephorus rubroniveus*, a predominant oligochaete species, survived for 190 days, maintaining its reproductive ability on the pile carrier. The oligochaete recovered from the carrier laid cocoons on plate media, hatching 5-9 juveniles per cocoon. The oligochaete needed 9-18 days for hatching and 32-60 days for growth to 15 mm length. Providing efficient and stable operation conditions, the ESCAPE process will contribute to resolution of sewage sludge treatment difficulties.

Keywords: aquatic oligochaetes, sludge reduction, activated sludge, acrylic pile fabrics

* Corresponding author:
E-mail: soda@fc.ritsume.ac.jp

1. はじめに

活性汚泥法は、都市下水の生物学的処理方法の主流である。下水中の有機物は、曝気槽中の細菌によって二酸化炭素と水に無機化される一方、一部は細菌の細胞増殖のために同化され、余剰汚泥が発生する。最初沈殿槽で回収される生汚泥と最終沈殿槽で回収される余剰汚泥は、下水汚泥と呼ばれ、日本では年間約230万トンも発生しており¹⁾、その発生抑制・減容化が必要とされている。

その方法として、嫌気性消化法、超音波破碎、オゾン酸化などが挙げられるが²⁾、微小動物利用法もその一つである^{2)~4)}。活性汚泥には、細菌を捕食する原生動物や後生動物など、微小動物が生息しており、食物連鎖が高次化すると、各栄養段階で有機物が無機化され、余剰汚泥を構成する微生物の全体量が減少する。しかし、流入水の水質・水量が変動する中、増殖特性が大きく異なる微小動物と細菌の理想的なバランスを保ち、汚泥発生量が少ない状態を安定して維持することは困難である。

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^{5),6)}。アクリル繊維である起毛（パイル）部分の表面には細菌が、ポリエステル繊維である生地（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^{5),6)}。曝気槽内のパイル担体には、貧毛類群集が $(479\sim690)\times10^4$ 個体/m²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が優占していることが報告されている⁷⁾。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⁾。

和歌山県では、パイル担体を利用した汚泥の減容化効果を梅加工場の排水処理施設以外でも検証するため、平成29年度新政策として、A浄化センターの汚泥貯留槽を用いた実証試験を実施している。本研究では、パイル担

体活性汚泥法を都市下水処理に適用するための基礎的な知見を得ることを目的とし、A浄化センターの実証試験装置から採取した貧毛類を用いて小型のパイル担体活性汚泥装置を用いた合成下水の連続処理実験を行い、余剰汚泥の発生抑制・減容化の効果を検証した。また、実験中の活性汚泥装置からウスベニイトミミズを回収し、平板培地上での産卵と孵化、幼生の成長を観察し、その繁殖力を確認するとともに、継代培養方法の確立のための基礎検討をした。

2. 実験材料と方法

2.1 貧毛類と活性汚泥

A浄化センターの実証試験装置のパイル担体から貧毛類を採取した。この実証試験装置の貧毛類は、梅加工場の活性汚泥法の曝気槽に由来するものである。実験に用いた貧毛類は、ウスベニイトミミズとユリミミズが、少なくとも混在していた。ウスベニイトミミズは、体長が～5 cm程度と大きく、広塩性である。ユリミミズは体長が～2 cm程度であり、刺激を受けるとコイル状に体を曲げる特徴がある。

滋賀県内の都市下水処理場から採取したものを種汚泥とし、60 Lの実容積において24時間サイクルのシーケンシングバッチ方式で合成下水を処理している立命館大学の研究室の活性汚泥を用いた。この活性汚泥をウスベニイトミミズの培養にも用いた。

2.2 合成下水

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（富士フィルム和光純薬株式会社）600 mg/L、Na₂HPO₄・12H₂O 83.6 mg/L、KH₂PO₄ 13.6 mg/L、NaCl 15 mg/L、KCl 7 mg/L、MgSO₄・7H₂O 10.25 mg/L、CaCl₂・2H₂O 9.27 mg/Lとした。この合成下水は、最初沈殿池槽の越流水を模擬しており、浮遊物質を含んでいない。これと同じものを後述するRun9～Run13の実験に用いた（全有機性炭素TOC 200 mg/L）。また、これを3倍に希釈したものをRun1～Run8の実験に用いた（TOC 70 mg/L）。合成下水の有機成分（カツオ肉エキス、ハイポリペプトン）と無機成分は、別々に濃縮して調整し、連続式活性汚泥装置に流入する直前で混合することで、設定濃度となるように供給した。また、有機成分は、必要分を1～3日毎に作成し、腐敗防止のために冷蔵しながら供給した。

2.3 連続式活性汚泥装置

Fig. 1に示す曝気槽 (5 L) と沈殿槽 (2 L) で構成される活性汚泥連続試験装置 (ASTレータ ASS-5P、株宮本製作所) を2台用いた。担体として、パイル織物 (RFV-52295、起毛3 cm、密度35本/cm²、株オーヤパイル) を7.5 cm×25.5 cm (244 g) に裁断したものをを用いた。パイル担体を1～2日間、事前に活性汚泥に浸漬させ、担体に約85 g-wetの汚泥が付着するように馴染ませた。1台の装置には、このパイル担体の起毛側に貧毛類50 g-wetを均一に広がるように付着させ、30分ほど静置してから曝気槽に設置し、試験系とした。もう1台の装

Fig. 1 Schematic diagram of the lab-scale ESCAPE process. A control reactor and a test reactor were, respectively, uninoculated and inoculated with oligochaetes.

置には、貧毛類を付着させずにパイル担体を曝気槽に設置し、対照系とした。曝気槽の内部は、汚泥が十分に攪拌されるように、曝気による上昇流と下降流が生じる構造をしており、曝気の泡が直接当たることによって、貧毛類が傷ついたり、容易に剥離しないように下降流が生じる位置にパイル担体を設置した。

実験条件をTable 1に示す。装置は室内に設置し、水温は17℃を下回らないようにヒーターで調整した。合成下水を滞留時間12時間 (10 L/d) として流入させ、Run1～Run8は低負荷運転 (140 mgTOC/L・d) を、Run9～Run13は高負荷運転 (420 mgTOC/L・d) を行った。返送汚泥比は1.4に設定し、溶存酸素濃度2～5 mg/Lになるように曝気した。

物質収支を計算する便宜上、初期汚泥濃度を高めに設定し、余剰汚泥の引き抜きをせずに14日間 (Run3は21日間、Run8は17日間) の運転を行った後、装置内の全汚泥を回収して定量した。曝気槽と沈殿槽の活性汚泥は、各Runですべて入れ替え、この実験を13回繰り返した (Run1～Run13)。一方、剥離した貧毛類があれば、回収してパイル担体に再付着させ、貧毛類とパイル担体は、Run1～Run13まで繰り返して用いた。貧毛類は、Run5の6日目に3.5 g-wet、Run8の7日目に4.0 g-wetを追加して付着させた。

Table 1 Experimental conditions for the lab-scale ESCAPE process

	Period (days)	Initial MLSS/MLVSS (mg/L)	Initial oligochaetes biomass (g-wet)	Influent TOC (mg/L)	Water temp. (℃)
Run1	14	6080/5210	50.0	70	25-26
Run2	14	8020/6180	63.3		25-26
Run3	21	8370/6750	82.0		25-26
Run4	14	12660/10450	76.0		22-26
Run5	14	9630/6830	86.2 (3.5g addition on day 6)		21-23
Run6	14	6440/5040	53.2		17-22
Run7	14	8380/66750	78.7		17-23
Run8	17	6600/5960	78.7 (4.0g addition on day 7)		18-20
Run9	14	5540/4380	87.2	200	18-22
Run10	14	8050/6730	57.9		17-18
Run11	14	6300/5490	74.5		18-20
Run12	14	5480/5020	74.5		17-22
Run13	14	6270/5510	83.8		17-21

Hydraulic retention time 12 hours, dissolved oxygen concentration 2-3 mg/L, return sludge ratio 1.4.

2.4 平板培地によるウスベニトミミズの培養

ウスベニトミミズの培養は、ヤマトヒメミミズ (*Enchytraeus Japonensis*) の培養⁸⁾にも用いられている Holtfreter 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) に寒天10 g/Lを添加したものを用いた。高温高压滅菌した後 (121℃、20分)、直径約10 cmのシャーレに約20 mLの培地を流し込み、室温に戻して固めたものを平板培地とした。

Run7終了時に試験系のパイル担体から、刺激を与えてもコイル状に体を曲げないウスベニトミミズを30匹選定して回収した。平板培地1枚に30匹のウスベニトミミズと活性汚泥0.5 mLを培地の中央に置き、25℃暗所にて静置した。3～20日後に産卵された卵包 (コクーン) を採取した。新しい平板培地1枚当たりに1卵包を移し、活性汚泥3 mL (MLSS 約8000 mg/L) を加えて25℃暗所にて静置した。幼生が孵化し、平均体長が5～30 mmまで成長する日数を観察した。なお、数日ごとに平板培地が乾燥しないように滅菌水を少量添加した。

2.5 分析方法

各Run最終日のMLSS (mixed liquor suspended solids) とMLVSS (mixed liquor volatile suspended solids) は、曝気槽と沈殿槽の汚泥をすべて回収し、下水試験法JISK 0102に準じた重量法で測定した。各Run途中の汚泥濃度は、光学式MLSS計 (ML-30N、笠原理化工業株式会社) を曝気槽に挿入して測定した。貧毛類の湿重量は、各Run最終日のパイル担体の質量から、貧毛類を付着させる前のパイル担体の重量を引き算することで推定した。本研究では、パイル担体を傾けたパッド上で5分静置して適度に水分を除いた状態のものの湿重量を測定した。処理水のSS (suspended solids) 濃度は孔径1.0 μmのろ紙を用いて測定した。ろ過した処理水のTOC (total organic carbon) をTOC-5000A (株式会社島津製作所) によって測定した。ただし、Run1～Run3では、SSとTOCの濃度のデータが欠損した。

2.6 物質収支

活性汚泥モデルASM3Cによると、典型値として、細菌細胞に摂取された有機物は、細胞内貯蔵物質に収率0.91 gTOC/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⁹⁾。したがって、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。なお、ASM3Cでは、従属栄養細菌の比増殖速度や比内生呼吸速度は温度上昇とともに増加するが、収率や細胞組成は温度に直接的には依存しないとされている。

曝気槽内では、微生物は自己分解し、細菌は微小動物群に補食されるため、実際の (正味の) 汚泥収率は、理論汚泥収率よりも小さくなる。正味の汚泥収率は、各Runの最終汚泥量と処理水にSSとして含まれて流出した汚泥量の合計値から、初期汚泥量を差分し、それを除去したTOC量で除して計算した (式1)。

正味の汚泥収率 (gVS/gTOC) =

$$\frac{\text{最終汚泥量 (gVS)} + \text{流出汚泥量 (gVS)} - \text{初期汚泥量 (gVS)}}{\text{除去 TOC 量 (gTOC)}}$$

式1

梅加工場のパイル担体活性汚泥法では、貧毛類の湿重量と乾燥重量の平均値は、それぞれ、13437 ± 74 g/m²、1790 ± 121 g/m²と報告されている⁷⁾。これらの値の比率0.133から、パイル担体の貧毛類の乾燥重量を湿重量の測定値から計算した。

3. 実験結果

3.1 活性汚泥の運転状況

低負荷運転 (Run1～Run8)

貧毛類の生存量、活性汚泥のMLSS濃度、処理水のTOCとSSの濃度をFig. 2に示す。有機物負荷量を140 mgTOC/L・dに設定したRun1～Run8までは、試験系と対照系の処理水のTOC濃度は概ね15～20 mg/L以下であり、良好に有機物が除去された (Fig. 2C)。初期MLSS濃度を高く設定し、各Runの途中で余剰汚泥を引き抜かなかったため、両系の汚泥の沈降性は低く、浮遊汚泥が流出してSS濃度が高くなることもあった (Fig. 2D)。Run1からRun3までは、試験系と対照系の最終的な汚泥量は、ほぼ等しかったが、Run4からRun7までは、貧毛類を導入した試験系の汚泥量が、対照系よりも最終的に減少した (Fig. 2B)。合成下水を用いたためか、梅加工場の排水処理施設や、A浄化センターの実証試験装置のもの比べて、活性汚泥の粘りが弱く、担体への付着量は少ないようであった。

試験系の担体に付着させた貧毛類は、Run4とRun6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 (Fig. 2A)。貧毛類が付着したパイル担体の写真をFig. 3に示す。パイル担体から剥離した貧毛類は、

Fig. 2 Performance of the lab-scale ESCAPE process treating synthetic wastewater. Oligochaetes biomass (A), MLSS (B), effluent TOC (C), effluent SS (D). Test reactor inoculated with oligochaetes (closed circle), control reactor (open circle). Influent TOC concentration 70 mg/L in Runs 1-8 (low loading 140 mgTOC/L · d), 200 mg/L in Runs 9-13 (high loading 420 mgTOC/L · d). Data for effluent TOC and SS concentrations in Runs 1-3 were not available.

強い曝気や水流にさらされると傷つきやすく、死滅してしまうことが予備検討でも確認されている。一方、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15 g-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、担体内部のベース部にまで潜り込むようにして貧毛類は分布していた。なお、担体中の貧毛類の頭部や尾部に統一された方向性は、観察されなかった。また、Run2以降は、担体に貧毛類の卵包が付着している様子を観察できた。

Run8においては、対照系のほうが、試験系よりも汚泥が減少したが、汚泥にもともと含まれていたと思われる小型の貧毛類のアブラミミズ (*Aeolosomatidae*) やウチワミミズ (*Dero* sp.) が対照系の担体が赤く変色して見えるほど増殖し、曝気槽壁面の気液境界部でも多く観察され、対照系として適切な状態ではなかった。その顕微鏡写真をFig. 4に示す。同時期の試験系では、これらの小型の貧毛類の大量増殖は観察されなかった。

高負荷運転 (Run9~Run13)

有機物負荷量を420 mgTOC/L · dに設定したRun9~Run13は、両系の処理水のTOC濃度は、10~35 mg/Lとなったが、良好に有機物が除去された。ただし、対照系に比べて試験系の処理水TOC濃度は、わずかに高い傾向となった (Fig. 2C)。対照系においては、処理水のSS濃度が一時的に高かった (Fig. 2D)。MLSS濃度は、各Runにおいて、最終的に増加したが、Run10とRun11においては、試験系と対照系の差は小さかった (Fig. 2B)。

試験系の貧毛類は、Run10においてわずかに減少したことを除き、曝気槽内でやはり良好に生存することができた (Fig. 2A)。貧毛類とパイル担体は、Run1~Run13まで繰り返して用いており、Run5とRun8の途中で貧毛類を少量追加したが、その成長速度を考慮すると、Run1開始時に担体に付着させたものの多くが、Run13まで生存したと思われる。Run8の対照系で観察された小型の貧毛類の顕著な発生は観察されなかった。

3.2 物質収支

連続式活性汚泥装置の固形分の物質収支をFig. 5に示す。また、正味の汚泥収率をFig. 6に示す。TOCとSSの濃度データが欠損したため、Run1~Run3の物質収支は算定できなかった。曝気槽内の汚泥濃度を高めに設定し、余剰汚泥を引き抜かなかったこともあり、特に試験系のRun5と対照系のRun10とRun11では、処理水にSSとして含まれて流出した汚泥量が、他のRunに比べて大きかった。湿重量による測定の精度が低いこともあるが、貧毛類のバイオマスは、各Runで大きくは変化せず、細菌を補食することによるその増殖収率は小さいといえる。

低負荷条件 (140 mgTOC/L · d) のRun4~Run7の物質

Fig. 3 Acrylic pile carries in the lab-scale ESCAPE process.

Fig. 4 Indigenous oligochaetes appeared in the control reactor in Run8. *Dero* sp. (about 10 mm) (A) and *Aelosomatidae* (about 1 mm) (B).

収支は、全般的に細菌細胞の増殖量よりも自己分解量が多かったことを示しており、試験系はそれに貧毛類による補食圧が加わったと考えられる。正味の汚泥収率は、両方とも負値であり、対照系は $-1.50 \sim -0.28$ gVS/gTOC、試験系は $-2.45 \sim -1.45$ gVS/gTOCとなった。Run8では、試験系の汚泥収率が -1.39 gVS/gTOCであったのに対し、対照系が -1.82 gVS/gTOCとなり、貧毛類を意図的に導入しなくとも、自然に増殖することがあれば、汚泥量が大きく減少することが示されたといえる。

高負荷条件 ($420 \text{ mgTOC/L} \cdot \text{d}$) のRun9～Run11の物質

Fig. 5 Mass balance based on volatile solids in the lab-scale ESCAPE process in Runs 4-13. TOC loading 140 mgTOC/L · d in Runs 4-8, 420 mgTOC/L · d in Runs 9-13.

Fig. 6 Observed sludge yield of the lab-scale ESCAPE process in Runs 4–13. TOC loading 140 mgTOC/L · d in Runs 1–8, 420 mgTOC/L · d in Runs 9–13. Indigenous oligochaetes grew in the control reactor in Run8. A typical value of the theoretical sludge yield is 1.46 gVS/gTOC.

Fig. 8 Required time for growth of *Monophyphorus rubroniveus* on plate media at 25°C. Adults in the test reactor in Run7 laid 9 cocoons (No.1–9).

収支は、細菌細胞の増殖量が大きく、自己分解や補食による減少量のほうが、小さかったことを示している。正味の汚泥収率は、対照系において0.31~0.62 gVS/gTOC、試験系において0.07~0.56 gVS/gTOCとなり、正值となったが、理論汚泥収率の典型値1.46 gVS/gTOCのわずか4~42%であった。

3.3 平板培地におけるウスベニトミミズの成長

Run7最終日に採取したウスベニトミミズは、平板培

Fig. 7 Growth of *Monophyphorus rubroniveus* on plate media. Cocoons (1.0–1.3 mm × 0.4–0.6 mm) (A), hatching (B), larva (15–20 mm) (C), and larva (35–40 mm) (D).

地上で産卵し、9個の卵包が回収され、これらを培養系No.1~No.9として観察した。それらの成長過程をFig.7に、孵化までの日数と平均体長が5~30 mmまでに成長するのに要した日数をFig.8に示す。

培養系No.1の場合、産卵13日後に卵包から6匹の白色の幼生が孵化した。2週間ほどすると、活性汚泥を置いた周辺から培地は部分的に液状化し、そこから幼生が下に潜り込んだ。幼生は、少しずつ体が赤色を帯び、体長10、20、30 mmになるまで、それぞれ28、39、57日を要した。体長が20 mm程度になると、数匹が一か所に集まり、ミミズ玉を形成した。また、培養系No.4は、産卵9日後に孵化したものの、原因は不明であるが、幼生は全滅してしまった。

No.1~No.9の培養系全体としては、卵包1個から孵化した幼生は5~9匹(平均6.3匹)であり、孵化に要する日数は9~18日であった。培養系No.4を除き、体長15 mmに達するまで32~60日、孵化してから伸長速度は0.38~0.84 mm/日であり、培養系によって差が大きかった。なお、予備検討において、平板培地に活性汚泥を入れないと、幼生は赤色にならず、あまり成長しなかった。

4. 考察

本研究では、ラボスケールではあるものの、梅加工場の排水処理施設^{5),6)}に続き、パイル担体活性汚泥法による

余剰汚泥の発生抑制・減容化の実証例を示すことができた。梅加工場の排水のように塩分が高くなくとも、ウスベニトミミズとユリミミズは、パイル担体を繰り返し利用したRun1～Run13までの約190日間、パイル担体の中で繁殖力を維持して生存し (Fig. 2A, Fig. 8)、余剰汚泥は、低負荷条件では正味発生せず、高負荷条件でも減少する効果を得た (Fig. 2, Fig. 5, Fig. 6)。Run1においてパイル担体に付着させた個体だけでなく、約190日間の間に孵化したウスベニトミミズの幼生も、余剰汚泥の減少に貢献した可能性がある。また、本法は曝気槽に担体を導入したことにより、生物膜法である接触酸化法の一つとも位置付けられる。貧毛類を導入しなかった対照系でも、余剰汚泥の発生量が比較的低かったことから、パイル担体には細菌類が付着し^{10)~12)}、生物膜が形成されて汚泥滞留時間が長くなり、食物連鎖が長くなることや¹³⁾、自己分解も進むことが、汚泥減容化の要因であり、貧毛類の捕食作用が、さらに効果を促進すると考えられる。なお、Run1～Run4では水温が比較的高く (Table 1)、内生呼吸によって汚泥が減容化しやすい条件であったとも考えられる。

本実験では50～100 g-wetの貧毛類が $1.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ のパイル担体に付着していたので (Fig. 2A)、その密度は2600～5200 g-wet/ m^2 であり、これは梅加工場の排水処理施設の報告値 (13437 $\pm$ 74 g-wet/ m^2)⁶⁾よりも小さく、より多量の貧毛類を保持することができれば、さらに効果が得られると考えられる。しかし、細菌類に比べると貧毛類の増殖は緩やかであり、梅加工場の排水処理施設の余剰汚泥量が3年間減少し続けたことを踏まえれば、数年の時間をかけたパイロットスケールの検証がさらに必要と考えられる。貧毛類の捕食活動による汚泥フロクの攪乱や、細菌数の減少によって、有機物除去能の低下¹⁴⁾も懸念されたが、本研究の実験結果の範囲では、そのような悪影響はなかった。また、貧毛類が排出した糞便是密度が高く、汚泥の沈降性と脱水性が高まるとの報告¹⁵⁾もあるが、本研究では顕著な影響は確認できなかった。有機物負荷量だけでなく、曝気槽内における貧毛類のバイオマス量、水温や水理学的滞留時間、汚泥滞留時間などの操作因子が余剰汚泥の発生量に及ぼす影響を明らかにすることが今後の課題である。

パイル担体活性汚泥法は、曝気槽の中で有機物を除去すると同時に汚泥発生量を抑制する方法であり、嫌気性消化槽や焼却炉などを併設せず、離れた場所の汚泥処理施設に下水汚泥を運搬しているような小規模下水処理場への導入が効果的である。一方、汚泥の減容化方法に

は、物理化学的な方法も含めて様々なものがあり²⁾、有機物除去の過程で発生してしまった下水汚泥を、貯留槽や濃縮槽に移し替えてから処理することが多い。実際に、オランダの実下水処理場においては、余剰汚泥の好気性消化槽にミズミズ亜科の*Aulophorus furcatus*をプラスチックの5 mm メッシュ担体とともに導入して処理を試みている¹⁶⁾。和歌山県のA浄化センターでも、余剰汚泥の貯留槽に貧毛類を付着させたパイル担体を設置し、好気性消化の変法として汚泥減容化を試みている。その場合、余剰汚泥だけでなく、最初沈殿槽から回収される生汚泥の減量化に及ぼす貧毛類の影響を明らかにすることも研究課題である。

貧毛類による下水汚泥の減容化に関する研究は、Ratsak & Verkuiljen²⁾が総説を記しているが、貧毛類を保持するための担体の材質や形状に関する知見は乏しい。本研究を除けば、Hendrickxら¹⁷⁾が、ラボスケールの汚泥減容化実験において、オヨギミミズ (*Lumbriculus variegatus*) の担体として、頭部と尾部が一定方向に揃う形状のメッシュサイズ250～450 μm のポリアミド製格子を比較しており、350 μm のものが最適であると報告しているくらいである。パイル担体は、その起毛の密度や長さ、表面積、曝気槽への充填量など、貧毛類を定着させる設計に改善の余地があると思われる。

水生の貧毛類には、小型のもの (アブラミミズ科 Aeolosomatidae など) と、大型のもの (ミズミミズ科 Naididae/Tubificidae、オヨギミミズ科 Lumbriculidae など) があり、特に付着性の大型のものが、汚泥の減容化に大きく貢献するとされている²⁾。Run8において、対照系ではアブラミミズとウチワミミズが大量増殖した一方、試験系ではそのようなことは観察されず、貧毛類の間では、細菌類の捕食者としての競合関係があることが推測される。本研究における貧毛類の湿重量測定法は精度が低く、種間構成の比率の評価も難しく、そのモニタリング手法の開発が必要である。本研究で用いられた貧毛類の優占種は、ウスベニトミミズ (*M. rubroniveus*) であり、梅加工場の排水処理での確認が日本初記録であり⁷⁾、Ratsak & Verkuiljen²⁾の総説にも記載がない珍しいものである。パイル担体活性汚泥法による効率的な汚泥減容化を図るには、特にウスベニトミミズの安定した継代培養方法を確立し、その生態に関する知見の集積が必要である。卵包からの孵化に要する時間や、幼生の成長速度は (Fig. 8)、本研究で得られた有用な基礎データであるが、貧毛類の産卵や孵化率や成長速度は、一般的にpHや温度、溶存酸素濃度、餌の大きさ (汚泥粒径) と量、捕食

する細菌の種類に依存することが知られている^{2), 3), 18), 19)}。イトミミズ (*Tubifex tubifex*) の場合、汚泥減容速度が 0.18~0.81 mg-VSS/mg-*Tubifex*・d と報告されている¹⁴⁾。オヨギミズの例では、摂食した汚泥のうち、70~90%は糞便として排出され、残り10~30%が消化されて減容化され、3%ほどが増殖に利用されたと報告されている²⁰⁾。また、オヨギミズが消化した汚泥当たりの収率が0.13~0.18 g-dry/g-VSとも報告されている^{20), 21)}。このような汚泥減容化に関するウスベニイトミミズの能力を評価することが重要である。

5. まとめ

合成下水と小型連続式活性汚泥装置を用い、パイル担体活性汚泥法による余剰汚泥の発生抑制・減容化効果を検証した。低負荷条件 (140 mgTOC/L・d) では、余剰汚泥は発生せず、正味の汚泥収率は、対照系は-1.50~-0.28 gVS/gTOC、試験系は-2.45~-1.45 gVS/gTOCとなった。高負荷条件 (420 mgTOC/L・d) では、余剰汚泥が発生したが、正味の汚泥収率は、対照系は0.31~0.62 gVS/gTOC、試験系は0.07~0.56 gVS/gTOCとなり、理論汚泥収率の典型値1.46 gVS/gTOCの4~42%であった。また、貧毛類の導入による処理水質への悪影響は認められなかった。優占種であるウスベニイトミミズは、約190日間、パイル担体の中で繁殖力を維持して生存した。パイル担体活性汚泥法の効率的かつ安定な運用方法を解明することができれば、下水汚泥の処理問題の解決に貢献することができるものと期待される。

謝辞：本研究の一部は（一社）近畿建設協会の研究助成を受けた。実験に用いたパイル織物はオーヤパイル(株)から提供された。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部：下水汚泥広域利活用検討マニュアル (2019)
- 2) Ratsak, C. H., and Verkuijlen, J.: Sludge reduction by predatory activity of aquatic oligochaetes in wastewater treatment plants: science or fiction? A review. *Hydrobiologia*, 564, 197-211 (2006)
- 3) Suzuki, R., Shimizu, Y., Ebie, T., Inamori, Y. and Sudo, R.: Growth characteristics of small aquatic oligochaete contributing on sludge reduction in biological wastewater treatment system. *Jpn. J. Water Treat. Biol.*, 41, 121-128 (2005)
- 4) 藤島繁樹：微小動物を利用した汚泥発生抑制型排水処理装置. *環境技術*, 36, 352-356 (2007)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 大高明史, 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)
- 8) 野呂佳代子, 伊藤 孝, 加瀬榛香, 山口智也：ヤマトヒメ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)
- 9) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht, M.: Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Publishing, London (2006)
- 10) Yamagiwa, Y., Takatsuji, W., Nakaoka, M., and Furukawa, K.: Nitrogen removal from dye-industry wastewater using pile fabrics as biomass carriers. *Jpn. J. Water Treat. Biol.*, 46, 79-79 (2010)
- 11) 山際秀誠：固定化担体を活用する新規窒素除去法の開発に関する研究——パイル織物の水処理用資材としての利用——. *繊維製品消費科学会誌*, 52, 40-45 (2011)
- 12) Takekawa, M., Ohta, S., Yoshida, D., Sato, T., Kaneshiro, K., Soda, S., Ike, M., and Furukawa, M.: Effects of operational conditions on treatment performances of single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) process. *Jpn. J. Water Treat. Biol.*, 49, 133-141 (2013)
- 13) 上原義昭：接触ばつ気法の動向. *環境技術*, 10, 912-920 (1981)
- 14) Huang, X., Liang, P., and Qian, Y.: Excess sludge reduction induced by *Tubifex tubifex* in a recycled sludge reactor. *J. Biotechnol.*, 127, 443-451 (2007)
- 15) Hendrickx, T. L. G., Temmink, H., Elissen, H. J. H., and Buisman, C. J. N.: Aquatic worms eat sludge: mass balances and processing of worm faeces. *J. Hazard. Mater.*, 177, 633-638 (2010)
- 16) Tamis, J., van Schouwenburg, G., Kleerebezem, R., and van Loosdrecht, M. C. M.: A full scale worm reactor for efficient sludge reduction by predation in a wastewater treatment plant. *Water Res.*, 45, 5916-5924 (2011)
- 17) Hendrickx, T. L. G., Temmink, H., Elissen, H. J. H., and Buisman, C. J. N.: The effect of operating conditions on aquatic worms eating waste sludge. *Water Res.*, 43, 943-950 (2009)
- 18) 国安克彦, 林 紀男, 稲森悠平, 須藤隆一：環形動物貧毛類の増殖に及ぼす環境因子の影響. *日本水処理生物学会誌*, 33, 207-214 (1997)
- 19) Hendrickx, T. L. G., Temmink, H., Elissen, H. J. H., and Buisman, C. J. N.: Design parameters for sludge reduction in an aquatic worm reactor. *Water Res.*,

- 44, 1017-1023 (2010)
- 20) Hendrickx, T. L. G., Temmink, H., Elissen, H. J. H., and Buisman, C. J. N.: Aquatic worms eating waste sludge in a continuous system. *Bioresour. Technol.*, 100, 4642-4648 (2009).
- 21) Hendrickx, T. L. G., Elissen, H. J. H., Temmink, H., and Buisman, C. J. N.: Operation of an aquatic worm reactor suitable for sludge reduction at large scale. *Water Res.*, 45, 4923-4929 (2011)
- (受付 2021. 4 .20)
- (受理 2021. 6 .22)