

B-59 各種の処理プロセスから発生する 余剰汚泥の嫌気性消化の特性評価

○濱田 浩志^{1*}・惣田 訓¹・池 道彦¹

¹大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻（〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1）

* E-mail: hamada-h@wb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我が国における都市下水の処理には、活性汚泥法を中心とした生物処理法が一般的に用いられている。その処理過程で生じる余剰汚泥は、全産業廃棄物の約2割を占め、下水道の普及に伴い、その発生量は年々増加してきている。ここで、余剰汚泥の処分には多大なエネルギーの消費が伴い、埋め立て処分場のための広大なスペースが必要であるため、省エネルギーで埋め立て処分量を削減できる汚泥の処理法の開発が求められている。

多大なエネルギー消費を伴わず、余剰汚泥を減容化し、かつメタンというエネルギー資源への転換も可能な技術として嫌気性消化が有望視されている。しかしながら、嫌気性消化の実施率は全国の汚泥処理施設の約15%にとどまっている。この低い普及率の原因として、従来の下水汚泥の嫌気性消化では、汚泥の分解率が低い、消化時間が長いといった課題が挙げられており、技術的な改善が求められている。

したがって、嫌気性消化の効率向上のために、処理プロセスの見直しや投入汚泥の前処理が検討されてきた。余剰汚泥の嫌気性消化は、投入汚泥の性状が大きく影響することが知られている。そこで、様々な処理プロセスから発生する余剰汚泥の性状と嫌気性消化の特性を評価することで、効果的な処理プロセスや投入汚泥の前処理のための知見が得られる可能性がある。

過曝気による汚泥の自己消化や嫌気ストレスによる有機物の細胞内外への高蓄積等、処理過程や処理プロセスの違いによる汚泥の性状の変化が考えられるため、本研究では、標準活性汚泥法（標準法）、嫌気-無酸素-好気法（A2O法）、凝集剤併用型ステップ流入式多段硝化脱窒法（step-feed法）の処理プロセスにおける各槽の活性汚泥を嫌気性消化に供し、汚泥の性状とバイオガス発生量との相関を検討した。

2. 実験方法

(1) 試料の採取

都市下水を処理している大阪府下の下水処理場より、汚泥試料を採取した。各処理プロセスの簡易フロー図と汚泥試料の採取箇所を図1に示す。標準法より初沈引抜汚泥（生汚泥）、反応槽入口汚泥、反応槽出口汚泥、返送汚泥、A2O法より生汚泥、嫌気槽入口汚泥、無酸素槽入口汚泥、好気槽入口汚泥、好気槽出口汚泥、返送汚泥、step-feed法より、第1無酸素槽入口汚泥、第1好気槽入口汚泥、第3無酸素槽入口汚泥、第3好気槽入口汚泥、返送汚泥を採取し、嫌気性消化試験の基質として用いた。また、嫌気性消化試験の種汚泥として、同処理場の汚泥の嫌気性消化プロセスから中温消化汚泥を採取した。なお、A2O法およびstep-feed法は同じ都市下水を処理しており、汚泥試料採取は2013年1月9日に実施した。標準法からの汚泥試料採取は、2013年5月9日に実施した。

(2) 汚泥の性状分析

採取した汚泥のpH、蒸発残留物（TS）、揮発性蒸発残留物（VS）、浮遊物質（TSS）、揮発性浮遊物質

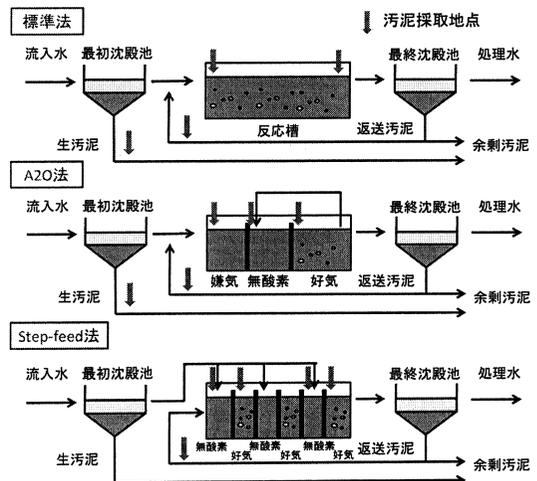


図1 対象廃水処理プロセスの簡易フロー図と汚泥試料の採取箇所

(VSS)、糖類、粗タンパク質、粗脂質、水理学的滞留時間 (HRT)、汚泥滞留時間 (SRT) を測定した。同様に、上清中のアンモニア性窒素 (NH₄-N)、全窒素 (T-N) を測定した。また、陽イオン交換樹脂 (DowexR MarathonR Na⁺ form, 20-50 mesh) を用いて細胞外ポリマー (EPS) を抽出し、EPS中のVS (VSEPS) も同様に測定した。

(3) 嫌気性消化試験

採取した汚泥試料を遠心分離 (3000×g, 10分, 室温) し、上清を適量取り除いてTSが約5% (w/w) になるように調整し、濃縮汚泥試料とした。濃縮汚泥試料5gおよび消化汚泥45gを100ml容広口バイアル瓶に投入し、アルミシールをし、窒素バージにより気層部の窒素置換を行った。このバイアル瓶を37℃で静置培養し、1日1回攪拌を行い、嫌気性消化を模擬した。経目的にバイオガス発生量をシリンジにより測定し、投入汚泥のVSあたりの累積バイオガス発生量 (ml/g-VS) を算出し、各汚泥試料間で比較評価した。

3. 実験結果および考察

(1) 汚泥の性状

各汚泥試料の性状を表1に示す。汚泥試料のpHは6.6-7.2であり、A2O法の返送汚泥が6.6と最も低い値を示した。TSは試料によって大きく異なり、標準法の反応槽汚泥試料は比較的 low (950-1010 mg/l)、A2O法およびstep-feed法の反応槽汚泥は高い傾向にあった (1920-2210 mg/l、2410-3500 mg/l)。返送汚泥は、最終沈殿池で濃縮されるため、どの処理プロセスでも高い値となった (2990-6030 mg/l)。TSに対するVSの割合は、返送汚泥が75.4-81.5%と高い傾向にあった。TSSおよびVSSも同様にそれぞれの返送汚泥が高く、TSSが92.3-92.8%、VSSが60.0-77.5%であった。NH₄-N濃度は、窒素除去を目的としたA2O法およびstep-feed法では生汚泥を除き0.1-6.4 mg/lと低く、標準法では19.9-31.5 mg/lと高濃度であった。T-N

も同様に標準法で高かった (12.8-24.5 mg/l)。糖類は、step-feed法第1好気槽入口汚泥で7.0%と最も低く、step-feed法返送汚泥で20.1%と最も高かった。粗タンパク質は、31.5-67.1%であり、A2O法の返送汚泥が67.1%と最も高かった。TS当たりのVSEPSは標準法の反応槽出口汚泥で最も高く、30.5%であった。Nielsenら (1995) の報告では、硝化-脱窒型の活性汚泥においてEPSはVSの約40%を占め、VS当たりのVSEPSが45%である本値と近似している。また、Cadoretら (2002) の報告では、全VSに対するEPSの割合は、5-24%と汚泥の採取日によって大きく異なる。窒素除去を目的としたA2O法とstep-feed法では、十分に硝化を進行させるため、標準法と比べてHRTは約2倍に設定されており、SRTは約5倍長かった。

(2) バイオガス発生量

投入汚泥のVS当たりの累積バイオガス発生量を図2に示す。標準法の汚泥を基質として用いた系では、生汚泥、反応槽入口、反応槽出口、返送汚泥の順にバイオガス発生量が多かった。A2O法の汚泥を基質として用いた系では、生汚泥、嫌気槽入口汚泥、好気槽入口汚泥、無酸素槽入口汚泥、返送汚泥の順にバイオガス発生量が多く、他の活性汚泥と比べ、嫌気槽入口汚泥試料のバイオガス発生量が約1.1倍多くなった。step-feed法の汚泥を基質として用いた系では、第1無酸素槽入口、返送汚泥、第1好気槽入口、第3無酸素槽入口、第3好気槽入口の順にバイオガス発生量が多かった。このように、それぞれの処理プロセスで生汚泥を基質として用いた系が最もバイオガス発生量が多かった (50日間の累計は標準法, 600 ml/g-VS, A2O法, 460 ml/g-VS)。余剰汚泥は主に微生物で構成され、タンパク質を多く含み、細胞膜を持っているため難分解性であるが、生汚泥は糖類等の易分解成分を多く含んでいるため、余剰汚泥と比べ投入VS当たりのバイオガス発生量が多いことが広く知られており、本研究でも同様の結果が確認された (Tang *et al.*, 2010, Kuglarz *et al.*, 2013)。一方、活性汚泥では、すべての処理プロセスで、処理槽の前段から採取した活性汚泥を嫌気性消化した場合にバイオガス発生が大きくなる傾向が認められた。

表1 汚泥試料の性状

処理プロセス	汚泥試料	pH	TS (mg/l)	VS (%TS)	TSS (%TS)	VSS (%TS)	NH ₄ -N (mg/l)	T-N (mg/l)	糖類 (%TS)	粗タンパク質 (%TS)	粗脂質 (%TS)	VSEPS (%TS)	HRT (h)	SRT (day)
標準法	生汚泥	7.2	1330	75.7	77.1	69.7	26.0	30.6	49.7	28.0	2.5			
	反応槽入口汚泥	7.1	1000	68.5	79.0	65.7	23.1	24.5	11.1	57.7	6.5	29.1	7.3	3.2
	反応槽出口汚泥	6.8	950	70.0	70.9	57.4	18.9	12.8	12.4	50.1	4.0	30.5	7.3	3.2
	返送汚泥	7.0	2990	79.5	92.8	77.5	18.6	20.6	8.2	50.6	10.2	14.7	7.3	3.2
A2O法	生汚泥	6.9	17200	90.1	65.4	58.4	38.5	69.2	36.2	24.0	4.1			
	嫌気槽入口汚泥	7.0	1920	77.3	79.6	67.7	6.4	13.2	12.3	35.4	2.4	6.4	15.5	17.0
	無酸素槽入口汚泥	7.2	2020	75.3	82.8	69.6	4.9	10.7	6.9	40.5	3.0	5.8	15.5	17.0
	好気槽入口汚泥	7.2	2210	77.6	81.2	67.9	4.3	4.8	11.2	41.2	7.6	6.0	15.5	17.0
	返送汚泥	6.6	5340	81.5	92.3	60.0	0.1	20.6	16.2	67.1	2.8	4.3	15.5	17.0
step-feed法	第1無酸素槽入口汚泥	7.1	3090	75.1	88.3	68.3	5.9	12.4	5.3	42.8	5.1	5.3	13.0	16.0
	第1好気槽入口汚泥	6.9	3500	74.2	86.7	67.0	6.3	7.0	4.6	32.4	4.8	7.0	13.0	16.0
	第3無酸素槽入口汚泥	6.9	2410	73.5	85.2	67.6	7.6	8.2	11.8	53.6	5.5	4.9	13.0	16.0
	第3好気槽入口汚泥	6.5	2750	74.3	84.8	66.4	1.0	10.3	8.9	41.4	5.7	6.8	13.0	16.0
	返送汚泥	7.2	6030	75.4	92.4	71.6	1.0	1.3	20.1	31.5	5.9	2.4	13.0	16.0

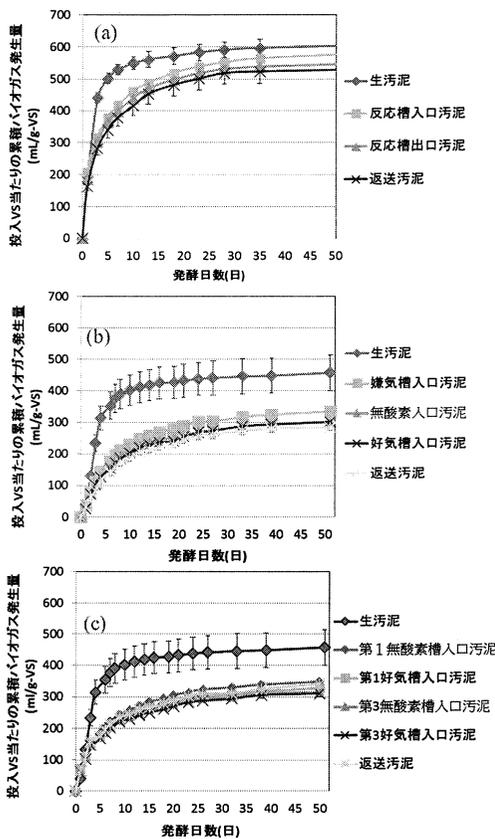


図2 投入VS当たりの累積バイオガス発生量の経時的変化
(a) 標準法、(b) A2O法、(c) step-feed法

(3) 汚泥の性状とバイオガス発生量の相関

相関分析により、各汚泥性状項目と嫌気性消化試験のバイオガス発生量との相関を検討した。その結果、バイオガス発生量は、投入汚泥中の VS_{EPS} と有意な正の相関を示し、また、処理プロセスにおける HRT および SRT と有意な負の相関を示した (確率変数 $p < 0.05$) (図3)。EPS 中に含まれる有機物は、細胞膜を破壊することなく嫌気性細菌が利用することができるため、易分解性であると考えられる。また、投入汚泥の SRT が長いほど可分解有機物の割合が少なく、かつ、VS 分解量当たりのメタン発生量が低下することが報告されている (寺町と高桑, 1985)。HRT も SRT 同様、汚泥に対する有機物負荷量に関連していることを考えれば、有機物負荷が高い処理プロセスの余剰汚泥が嫌気性消化に適していることが示唆されたものといえる。

これらより、投入汚泥中の VS_{EPS} 、処理プロセスにおける HRT および SRT が余剰汚泥の嫌気性消化におけるバイオガス発生量の多少を推定するための指標になることが示唆された。

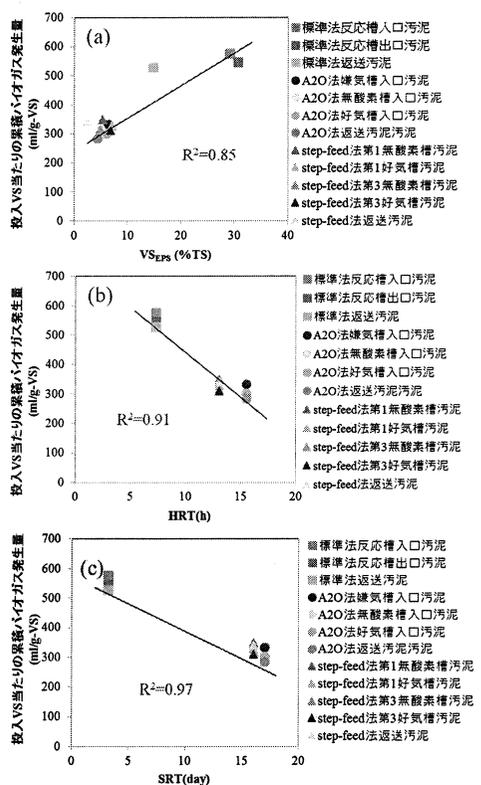


図3 汚泥の性状と嫌気性消化試験におけるバイオガス発生量との関係
(a) VS_{EPS} 、(b) HRT、(c) SRT

4. まとめ

本研究では、各種の処理プロセスから採取した余剰汚泥を用いて、嫌気性消化試験を行った。その結果、処理槽の前段から採取した活性汚泥を嫌気性消化した場合に、バイオガス発生量が大きくなる傾向が示され、生汚泥が嫌気性消化されやすいことが確認された。また、標準法から発生する余剰汚泥を用いた場合に、A2O法および step-feed法から発生する余剰汚泥よりも、バイオガス発生量が大きくなることが明らかとなり、これには、EPS 含量、処理プロセスの HRT、SRT が関係していることが示唆された。

参考文献

- 1) P. H. Nielsen, B. Fratund, K. Keiding. 1995. Applied Microbiology and Bionotechnology. 44: 823-830
- 2) A. Conrad, J. C. Block. 2002. Enzyme and Microbial Technology. 31: 179-186
- 3) B. Tang, L. Yu, S. Huang, J. Luo, Y. Zhuo. 2010. Bioresource Technology. 101: 5092-5097
- 4) M. Kuglarz, D. Karakashev, I. Angelidaki. 2013. Bioresource Technology. 134: 290-297
- 5) 寺町和宏, 高桑哲男. 1985. 第22回下水道研究発表会講演集. 487-489.