

下水汚泥の嫌気性消化における余剰汚泥の濃縮・加熱効果*

高島 正信^{*1}, 中尾 総一^{*2}

Effects of Concentration and Thermal Pretreatment of Waste Activated Sludge on Anaerobic Digestion of Sewage Sludge

Masanobu TAKASHIMA^{*1} and Nobuichi NAKAO

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

The objective of this study was to investigate the effects of concentration (12-15%) and thermal pretreatment (130°C) of the waste activated sludge portion in influent on anaerobic digestion of sewage sludge. The experimental results showed that the thermal pretreatment improves volatile solids destruction by several percent and gas production by more than 10 percent. The thermal pretreatment, however, produced more colored substances, which is disadvantageous. On the other hand, the concentration of waste activated sludge was not effective for those major operating parameters, and even made the dewaterability of digested sludge worse. Overall, it is concluded that thermal pretreatment of waste activated sludge can improve the performance of anaerobic digestion of sewage sludge.

Key Words : Anaerobic Digestion, Concentration, Sewage Sludge, Thermal Pretreatment, Waste Activated Sludge

1. 緒 言

有機性廃棄物の嫌気性消化は、嫌気性微生物による有機物の減量化・安定化とメタンガスとしてエネルギー回収を可能にする処理プロセスである。さらに、病原性微生物の死滅効果や悪臭の低減も期待できるため、消化汚泥を肥料などに再利用することも可能である。このような特徴から、有機性廃棄物の嫌気性消化は、循環型社会構築に欠かせない環境保全技術として認識されている。

有機性廃棄物の一つである下水汚泥については、わが国では乾燥重量で年間およそ2,200千トン発生しているが、汚泥中有機物のエネルギー化率が約14%（2012年度）にとどまることが課題となっている⁽¹⁾。そのため、国土交通省が発表した新下水道ビジョンにおいても、下水処理場を地域のエネルギー拠点とし、創エネルギー化を図るうえで、嫌気性消化は汚泥処理における中核プロセスとして取り扱われている⁽²⁾。

しかしながら、下水汚泥の嫌気性消化には余剰汚泥の難分解性の問題が存在する。下水汚泥は、下水由来の「生汚泥」(primary sludge, PS)と、下水を処理した活性汚泥由来の「余剰汚泥」(waste activated sludge, WAS)の2種類の汚泥から成る。生汚泥は、トイレ紙、食物片など分解しやすい炭水化物系の成分が多く含まれ、分解率が60%程度に達する。これに対して余剰汚泥は、細菌の細胞膜・細胞壁に守られ分解しづらく、分解率は一般に40%程度にとどまることが長らく課題とされてきた。一方、わが国では、固形物濃度(TS) 5%程度に機械濃縮して投入する高濃度嫌気性消化が徐々にその適用を拡大している。流入汚泥を高濃度化すると、消化槽容量を小さくできることに加え加温用燃料の削減を可能にし、嫌気性消化の運転効率化や経済性に役立つと考えられている⁽¹⁾。

以上のような背景から、本研究では下水汚泥の嫌気性消化において、投入エネルギー量を節約しながら余剰汚

* 原稿受付 2018年2月28日

^{*1} 工学部 建築土木工学科

^{*2} 関西電力株式会社 研究開発室技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王子3丁目11-20)

E-mail: takasima@fukui-ut.ac.jp

泥の分解性を向上させる手段として加熱処理と汚泥濃縮に着目し、1) 前処理として流入余剰汚泥に加熱処理を施したときの効果、および2) 流入余剰汚泥の濃度を高めたときの影響、について検討することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 実験装置および運転方法

Fig. 1 に示すように、余剰汚泥の遠心濃縮を組み合わせた2系列の実験装置を準備し、1系列はコントロール系、もう1系列は流入余剰汚泥に前処理として加熱処理を施した系とした。余剰汚泥は、流入量の小さい方が消化槽加温エネルギーの節約になるため、その濃度を2段階に設定した。ただし、どの濃度条件でも、生汚泥と余剰汚泥の固形物比が約3:2の一定になるようにした。実験条件をTable 1にまとめて示す。生汚泥の濃度はおおむね一定とし、余剰汚泥はその濃度に応じて容量混合比を減じる設定とした。

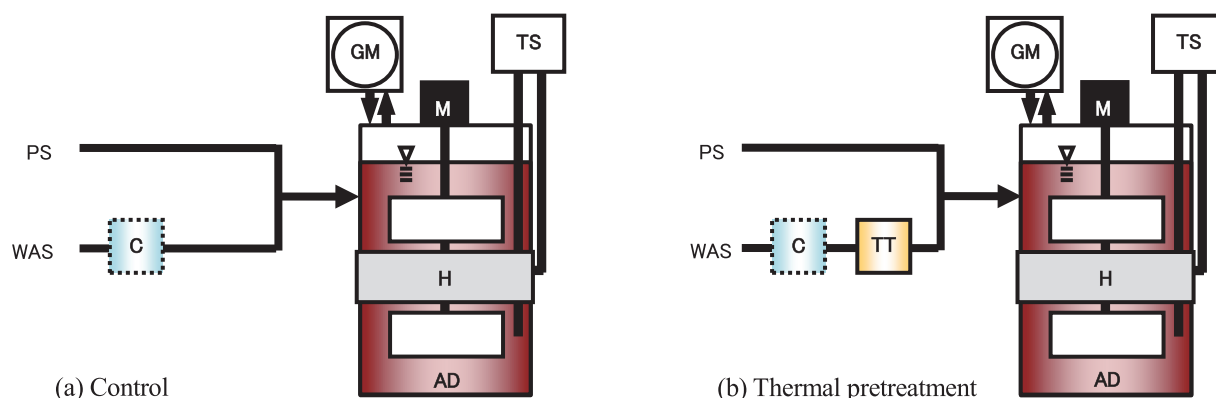


Fig. 1 Anaerobic digester systems.

AD: anaerobic digester, H: heater, M: motor, GM: gas meter, TS: thermo-stat, C: centrifuge, TT: thermal treatment.

Table 1 Experimental conditions for influent sludge

Run	TS of PS (g/L)	TS of WAS (g/L)	Volume ratio (PS: WAS)
1	40~50	40~50	3:2
2	40~50	120~150	3:0.67

* The TS ratio of PS and WAS is approximately 3:2 for every run.

嫌気性消化槽はアクリル樹脂製、有効容量 2.0 L の完全混合型で、攪拌機 (Z-1300, EYELA) と攪拌羽根によって約 100 rpm で槽内を攪拌した。消化槽の温度はサーモスタット (E5CSV, オムロン) とリボンヒーター (100 W, 野中理化器) によって約 35 °C に調節した。生成したバイオガスは、成分分析用サンプルコックと乾式脱硫カラムを経て湿式ガスメーター (WS-1A, シナガワ) で計量した。

下水汚泥の投入と消化汚泥の引き抜きは、Run 1 では4連の送液ポンプ (7553-80, Cole-Parmer) とタイマー (ソインタイマーPM4H-W, Panasonic) を用いて1時間ごとに行い、Run 2 では流入汚泥濃度が高くなるとポンプ使用が困難となるため1日1回マニュアルで行った。滞留時間 (HRT) は15日で一定とし、投入・引き抜き量としては133 mL/日であった。

2.2 下水汚泥と前処理

供試下水汚泥は、福井市日野川浄化センターから別々に採取した生汚泥と余剰汚泥である。生汚泥の方は、重力沈殿または遠心分離機 (約 5,000 rpm, 10 分; HD-30D, 平山製作所) により、4~5%になるよう濃度調整した。余剰汚泥の方は、おおむね Run 1 では4~5%, Run 2 では12~15%になるように濃縮した。その濃縮にはカチオ

ン系高分子凝集剤（TS 当り添加量約 0.8%；ダイヤブロック KP1200B，三菱レイヨン）を併用した遠心濃縮を用い，Run 2 ではさらに遠心濃縮汚泥を重しで 1 日間ほどプレスすることによって所定の濃度を達成した。

種汚泥は，元々は同じ浄化センターから採取した中温嫌気性消化汚泥であった。

余剰汚泥に対する前加熱処理は，簡易型オートクレーブ（TEM-V1000，耐圧硝子工業（株））を用いて 130 °C，1 時間，攪拌速度約 100 rpm の条件で行い，加熱処理後は自然放冷した。

2.3 分析方法

濃度分析は Standard Methods⁽³⁾に従った。溶解性液は，10,000rpm で 10 分間高速遠心した後，0.45 μm メンブレンフィルター（A045A047A，アドバンテック）でろ過して作成した。

汚泥溶解性液の色度は分光光度計（DR/4000U，Hach）を用いた ADMI 法（Standard Methods 2120E），汚泥脱水性は CST メーター（304B，Triton Electronics）を用いた CST 法（Capillary Suction Time，Standard Methods 2710 G），ガス成分（メタンおよび二酸化炭素）は TCD 検出器付きガスクロマトグラフ（GC-9A，島津製作所）で測定した。

3. 結果および考察

3.1 汚泥分解およびガス発生

流入汚泥の TS および VS 濃度の平均値を Table 2 に示す。加熱処理が施された結果，余剰汚泥の VS 濃度は 1 ～4%程度減少しているが，ほとんど変化ないと言ってよい。一方，粒子状 VS 濃度（1μm 以上）は，加熱処理により無処理濃度の Run 1：68.3%，Run 2：58.2%まで減少しており，粒子状物質を破壊する効果がみられた。また，理由は明らかでないが，余剰汚泥が濃縮されるほど破壊効果の大きいことがわかった。

Fig. 2 に，VS 濃度，ガス発生量，消化汚泥の色度および脱水性の経日変化を示す。また，運転がより安定する実験後半（5 週間分）の結果を，系列ごと，Run ごとに平均値で Fig. 3 にまとめる。比較的バラツキの大きい実験結果があったので，主に Fig. 3 の平均値による結果をもとに考察する。バラツキを生む最大の原因として，下水汚泥の性状が採取した季節や時間によって変化することが考えられる。もちろん，実験・分析操作に起因するバラツキも存在する。

まず，汚泥有機物の分解の程度を示す VS 分解率は，コントロールに余剰汚泥加熱処理が組み込まれると Run 1 で 53.6→56.5%，Run 2 で 50.7→56.2%とどの Run でも上昇した。また，その相対的な上昇率は，Run 1：5.4%，Run 2：10.8%となり，余剰汚泥が濃縮されるほど高くなった。

ガス発生率については，コントロールに余剰汚泥加熱処理が組み込まれると Run 1 で 0.460→0.524 L/gVS，Run 2 で 0.454→0.501 L/gVS と VS 分解率と同様にどの条件でも上昇した。また，その相対的な上昇率は Run 1：13.9%，Run 2：10.4%と，どの Run でも 10%以上であった。上昇率自体は，VS 分解率と逆の傾向であった。なお，発生ガス中の成分濃度は，メタン 60～61%，二酸化炭素 36～37%ときわめて安定しており，また，一般的な濃度範囲内にあった。

以上より，VS 分解率とガス発生率という主要評価指標においては，ややバラツキがあったものの，相対的な上昇率が数%～十数%と流入余剰汚泥に加熱処理を組み込む効果が認められたと言える。わが国における実規模の下水汚泥嫌気性消化では，負荷量が低いこともあり，VS 分解率 50%以上，ガス発生率 0.5 NL/gVS 以上が一般的である（N は 0 °C，1 気圧の標準状態を示す）⁽⁴⁾。また，室内実験は低めの処理成績が得られることが多いの

Table 2 Concentration of influent sludge

	Run	PS	WAS (Control)	WAS (Thermal pretreatment)
TS (g/L)	1	42.4	39.5	39.1
	2	42.6	130.7	127.2
VS (g/L)	1	35.1	30.0	29.6
	2	35.0	102.4	98.5
Particulate VS (g/L)	1	27.1	29.3	20.1
	2	32.6	85.9	50.0

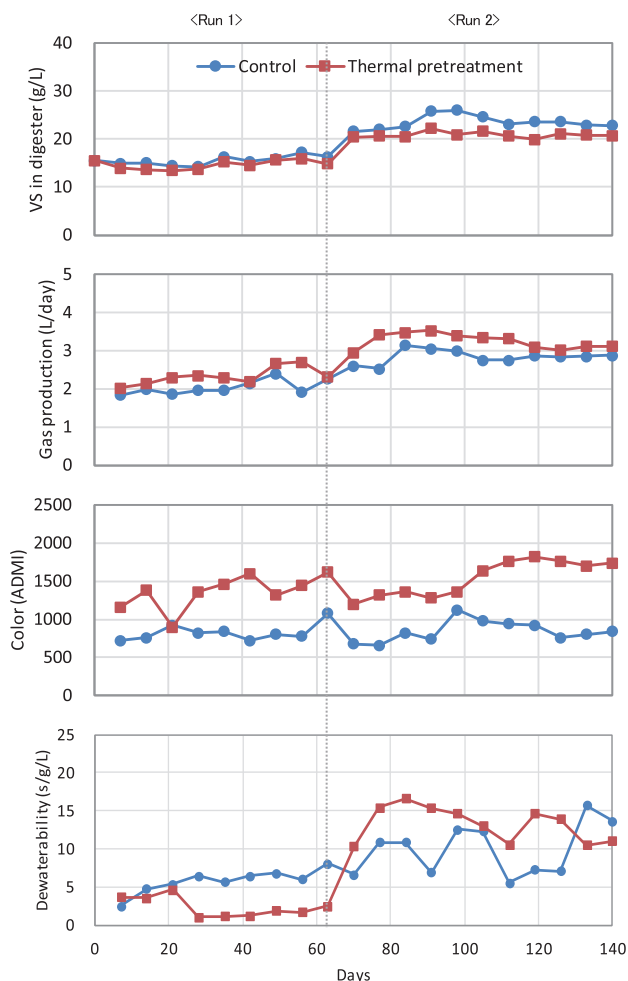
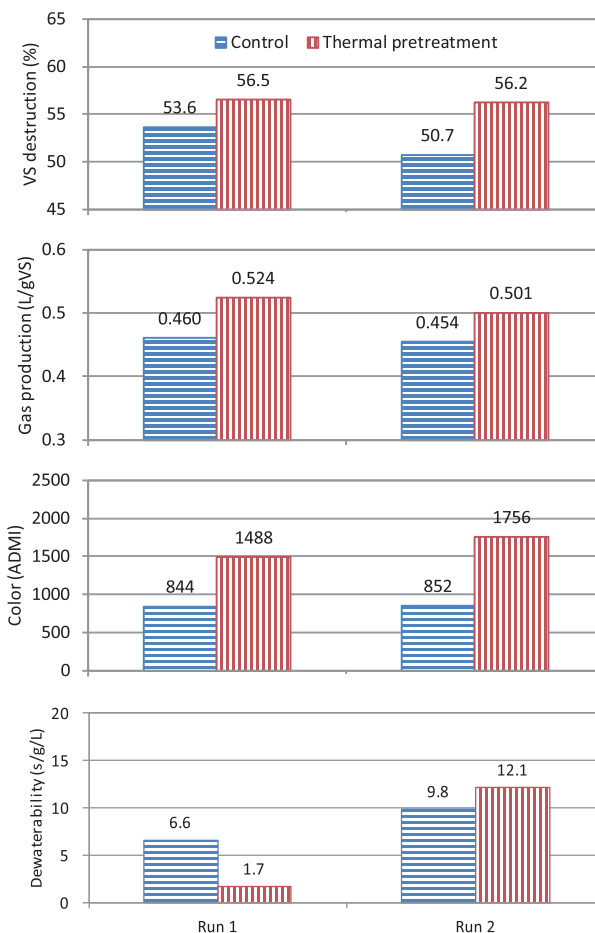


Fig. 2 Time course of major experimental results

Fig. 3 Summary of major experimental results
(average of the last 5 analyses)

で、今回の前加熱処理を組み込んだ結果は高い方に位置すると考えられる。しかし、流入余剰汚泥の濃縮の効果については、今回の実験からは明確に判断できないと思われる。この流入余剰汚泥の加熱処理と濃縮の効果については、報告例がきわめて少ない。筆者の一人が、混合下水汚泥の濃度を段階的に調整し、余剰汚泥のみに前加熱処理を施したところ、濃度の上昇とともに VS 分解率とガス発生率は微減した⁵⁾。今回は、下水汚泥の採取時期などによって分解性は異なり、設定条件も異なるが、濃縮されないときの結果の方が処理成績のよい傾向があった。

消化汚泥中のアンモニア性窒素濃度は、コントロール系で 745~1,380 mg/L、余剰汚泥加熱系で 880~1,740 mg/L の範囲であった (図示なし)。両系とも阻害濃度 (3,000~4,000 mg/L 以上)⁶⁾より十分に低いものであり、アンモニア阻害は生じていなかったと考えられる。

3.2 色度および脱水性

Fig. 2 および Fig. 3 には消化汚泥ろ液の色度も示されている。余剰汚泥の加熱処理が組み込まれるとその相対的な上昇率は Run 1 : 76%, Run 2 : 106%と 76~106%の範囲であった。よって、色度はどの Run でも加熱処理が組み込まれると上昇しており、また、VS 分解率と同様に余剰汚泥が濃縮されるほど上昇率は大きくなった。VS 分解率と色度から、余剰汚泥の濃度が高くなるほど (含水率が減少するほど)、加熱効果が汚泥固形物に到達しやすくなることが考えられる。

今回の加熱処理温度 130 °C は汚泥分解に最適といわれる 160~180 °C⁶⁾より低く抑えたものの、それでも無処理コントロールの 2 倍前後の色度が生成していた。参考に、Run 1 における消化汚泥ろ液の写真を Fig. 4 に示す。色度生成はメイラード反応によって起こることが知られており⁶⁾、これが加熱処理の最大の欠点である。色度の観点からは、これ以上の加熱処理温度には設定しづらい。しかし、研究室の既往研究⁵⁾では加熱処理温度 170 °C

で今回の数倍もの色度があったことを考慮すると、色度の差は小さくなっており、130℃は実用性の高い加熱温度と考えられる。

Fig. 2 および Fig. 3 より、消化汚泥の脱水性については、コントロールに余剰汚泥加熱処理が組み込まれると Run 1 で 6.6→1.7 秒/g/L, Run 2 で 9.8→12.1 秒/g/L と、他の指標とは明らかに異なる傾向がみられた。Run 1 では一般に観察されるように加熱処理によって脱水性は大幅に改善されたが、Run 2 では悪化した。このような結果となった理由は明らかではないが、その理由の一つとして、余剰汚泥が加熱処理されると細分化されてコロイド状の低分子物質を形成するが、それが消化後に未分解のまま余剰汚泥濃度が高いほど多量に残って汚泥脱水に悪影響を及ぼしたと推測される。

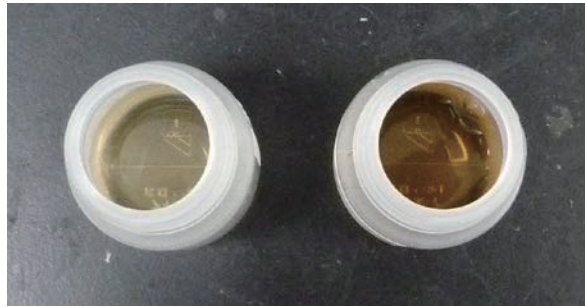


Fig. 4 Photograph of digestate filtrate (Left: control, Right: thermal pretreatment)

4. 結 言

本研究では下水汚泥の嫌気性消化において、流入余剰汚泥に対する加熱処理ならびに汚泥濃縮の効果を検討した。混合汚泥の嫌気性消化において流入余剰汚泥に加熱処理を組み込むと、コントロールと比較して VS 分解率が数%, ガス発生量が十数%改善され、その効果が確認された。一方、流入余剰汚泥の濃縮は、VS 分解率、ガス発生量という主要パラメーターに関してはその効果が明白に確認できなかった。また、余剰汚泥の加熱処理は消化汚泥の色度の生成を促し、これは従来、加熱処理の欠点として指摘されていたものである。余剰汚泥加熱の脱水性への影響は余剰汚泥濃度によって異なり、余剰汚泥 TS40～50 g/L では向上したが、TS120～150 g/L では悪化した。以上より、総合的にみて、下水汚泥の嫌気性消化において余剰汚泥加熱は効果的であるが、余剰汚泥濃縮は必ずしも有利にならないことが示唆された。

謝 辞

下水汚泥を提供してくださった福井市下水道部に感謝いたします。

文 献

- (1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, “下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—改訂版—” (2015).
- (2) 国土交通省, “新下水道ビジョン～循環のまちの持続と進化～”, 下水道政策研究委員会報告書 (2014).
- (3) APHA, AWWA and WEF, “Standard methods” (2000).
- (4) (公社) 日本下水道協会, “下水道施設計画・設計指針と解説” (2009).
- (5) 高島正信, “下水汚泥の嫌気性消化における前加熱処理と高濃度化の影響”, 福井工業大学紀要, Vol. 46 (2016), pp. 89-94.
- (6) H. Carrère et al., “Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review”, *J. Hazard. Mater.*, Vol. 183 (2010), pp. 1-15.

(平成 30 年 3 月 31 日受理)