

(81) 中温と高温の嫌気性消化汚泥の粘性特性の比較

寺嶋 光春^{1*}・ゴエル ラジブ¹・小松 和也¹・安井 英斉¹
・高橋 弘²・李 玉友³・野池 達也⁴

¹栗田工業株式会社 (〒329-0105 栃木県下都賀郡野木町川田五丁山1-1)

²東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

³東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

⁴日本大学大学院総合科学研究科環境科学専攻 (〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-1)

* E-mail: mitsuharu.terashima@kurita.co.jp

高温条件の嫌気性消化プロセスは中温条件よりも生物学的な活性が高いため、短い滞留時間で同等の消化率が得られると考えられている。高温条件にプロセスを変更する際には生物学的な性能評価に加えて、粘度に代表される汚泥の物性を考慮したリアクターの設計が必要である。運転温度以外の条件を完全に等しくした2系列の嫌気消化連続運転装置を用いて中温消化汚泥と高温消化汚泥の粘度特性を調べたところ、いずれの粘性も擬塑性流体の特徴を有していること、及び、擬塑性粘性係数 μ_p と構造粘度指数 n は汚泥濃度の指数関数で表現されることが判った。高温消化汚泥の粘度は中温消化汚泥に比べて低いため、中温条件から高温条件にプロセスへ変える際には、施設の攪拌装置を大幅に増強することなく、槽内の消化汚泥濃度を約10 g/L高めた高濃度消化法を適用できると考えられた。

Key Words : anaerobic digestion, mesophilic, non-Newtonian, thermophilic, viscosity

1 はじめに

嫌気性消化プロセスの技術的改善には、嫌気性消化槽の加熱量の削減やガス生成量の増大を図ることを目的として、高分子凝集剤を使用して消化槽内の汚泥濃度を高める高濃度消化法がある。この方法では投入汚泥濃度を50 g/Lに高めて大幅なガス生成倍率の増大が認められたことが報告されている^{1) 2)}。また、嫌気性消化反応を司る微生物の活性は、高温域(約55℃)の方が中温域(約35℃)よりもかなり高いことが明らかになっている^{3) 4)}。そこで、高濃度消化法と高温条件の運転を組み合わせることで嫌気性消化プロセスの消化率やメタンガス発生量を大幅に向上できる可能性がある⁵⁾。

嫌気性消化反応を進めるリアクター(嫌気性消化槽)に要求される主な物理的な役割は、(1)投入汚泥とリアクター内の微生物を十分に接触させること、(2)底部への固形物の堆積を防いでリアクターの有効容量を維持すること等があげられる^{6) 7)}。

これらはリアクターの汚泥を攪拌混合することで得られるが、この攪拌混合には汚泥の粘性が大きな影響を及ぼすことが知られている。粘度の高い汚泥ほど、大きなエネルギーを与えないと混合されないため、高濃度消化法の装置を考える際には、予め

汚泥の粘性特性を適切に把握しておくことが大変重要である。

一方、汚泥の粘性に関する研究は、多くが汚泥のパイプライン輸送における配管の圧力損失を計算することを目的にしたもので、これらのデータは10℃から30℃程度の範囲において求められている^{8) 9) 10) 11)}。液体の粘度は温度で変化するから、これらを嫌気性消化槽の運転温度域である35-55℃に外挿することは設計上の誤差を招きやすいと考えられる。また、嫌気性消化汚泥の粘度を直接測定した研究は、比較的濃度の低い中温域の汚泥を対象としたものがほとんどであり^{8) 12) 13) 14)}、高温消化の汚泥を調べた事例は極めて限られている。高温域で生育する微生物叢は中温域と全く異なるため、粘性を支配する固形物の特性は高温消化汚泥と中温消化汚泥で違う可能性がある。このため高温嫌気消化槽の攪拌混合の検討には高温消化汚泥を用いて粘性を把握する必要があると考えられる。

近年はハイドロダイナミクスのシミュレーション技術が普及し、対象流体の物性が把握されていれば、リアクターの設計及び運転条件の検討をコンピュータ上で行えるようになった。そのため、嫌気性消化プロセスの消化率向上やメタンガス発生量増大の検討は、生物学的なアプローチに加えて、消化汚

泥の物性とハイドロダイナミクスに着目した攪拌混合の研究を行うことで大いに進むと考える。

これらの背景から、筆者らは中温と高温の嫌気性消化汚泥の粘性を比較することにした。この研究では、同一の下水汚泥を基質として温度以外の条件が完全に等しい2系列で中温嫌気消化槽と高温嫌気消化槽を運転し、両者の消化汚泥の粘性特性の違いに焦点を当てた。これは処理施設で嫌気性消化プロセスを中温条件から高温条件に変更する際に、汚泥の粘性変化に伴う攪拌装置の改造や運転条件の変更を考察しやすくすることを意図したためである。

2 実験方法

(1) 嫌気性消化槽

中温と高温の汚泥の粘性を比較するために、温度以外の条件は完全に等しい2系列の嫌気消化試験装置を運転して中温と高温の消化汚泥を得た。

この試験装置を模式的にFigure 1に示した。試験装置は、有効容積 0.915 m³の嫌気性消化槽、遠心濃縮による固液分離装置等から構成される。嫌気性消化槽の運転温度は、高温条件の装置（以下、高温系と記す）では 50-53℃、中温条件の装置（以下、中温系と記す）では 33-35℃にそれぞれ保った。

高温系の種汚泥は高温嫌気消化プロセスが行われているM下水処理施設から採取し、中温系の種汚泥はT下水処理施設の中温の嫌気性消化施設から採取した。それぞれの嫌気性消化槽にT下水処理施設の加圧浮上槽から採取した濃縮余剰汚泥(濃度 35 g/L, TVS/TS比 0.82-0.84)を 38 L/dayの負荷(容積負荷 1.5 kg/m³ d)で投入しHRTを 24 dayに制御した。嫌気性消化槽からオーバーフローした汚泥に微量の高分子凝集剤を添加して遠心濃縮機によって固液分離処理を用い、濃縮汚泥を嫌気性消化槽に返送し、槽の汚泥濃度をおよそ 70 kg/m³に維持した。これは、

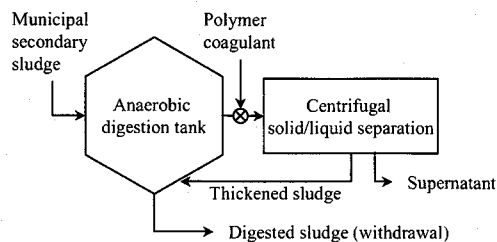


Figure 1 Experimental apparatus (anaerobic digester)

Table 1 Sludge concentration for viscometric test

Sludge concentration (g/L)	
Mesophilic AD sludge	72, 66, 63, 57, 55, 53, 49, 39, 19
Thermophilic AD sludge	67, 59, 48, 37, 35, 27

濃縮によって固形物濃度を高めることで嫌気性消化汚泥の固形物に支配される粘性を測定できると考えたものである。この濃縮時に添加する高分子凝集剤については、滞留時間 30 日間の実験系において消化反応や粘性に及ぼす影響は顕著に現れないことが報告されており¹⁵⁾、この理由の一つとしては嫌気消化で生物的に分解する¹⁵⁾ことなどが考えられている。このことから本実験において濃縮時に添加する高分子凝集剤が汚泥粘性に与える影響はほぼ無視できると考えられる。

(2) 嫌気消化汚泥

高温系と中温系の2系列の嫌気性消化槽を5ヶ月間運転して種汚泥の影響が無視できる状態にしてから、それぞれの嫌気性消化槽から汚泥を採取した。

消化汚泥の TVS/SS 比は 0.6 であり、レーザ回折式粒度分布測定装置(島津製作所製 SALD-7000)による平均粒径の測定結果は、中温消化汚泥は 32 μm、高温消化汚泥は 20 μm であった。

予備試験として、遠心濃縮の脱離液で希釈した汚泥と水道水で希釈した汚泥の粘性を比較したところ、擬塑性流体の粘性パラメータ(構造粘度指数 n 、擬塑性粘度 μ_p)の値は両者でほとんど差が無かった。このことから希釈液として実験操作が簡便な水道水を使うことができるものと判断し、消化汚泥を水道水で希釈して汚泥濃度を段階的に変えた粘性測定用の試料を得た。測定に用いた汚泥濃度を Table 1に示した。

(3) 汚泥の粘性パラメータ

一般の生物汚泥は、擬塑性流体の特性を有すると考えられている^{8), 9), 10), 11), 14), 16)}。また、擬塑性流体の粘性パラメータは、生物汚泥の濃度で近似できることが指摘されている^{8), 17), 18)}。そこで、汚泥濃度に対する n と μ_p の関係を高温消化汚泥と中温消化汚泥についてそれぞれ調べれば、両者の特性の違いを定量的に比較できると考えられる。擬塑性流体のレオロジー方程式を(1)式に、粘性パラメータである構造粘度指数(n)及び擬塑性粘度(μ_p)と汚泥濃度の関係式^{8), 17), 18)}を(2)と(3)にそれぞれ示す。

$$\tau = \mu_p \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1)$$

$$n = a \cdot \exp(b \cdot X) \quad (2)$$

$$\mu_p = c \cdot \exp(d \cdot X) \quad (3)$$

Where, τ : shear stress (Pa), μ_p : pseudoplastic viscosity (Pa sⁿ), n : flow behavior index for pseudoplastic model (-), $(-dv/dy)$: shear strain rate (s⁻¹), a : empirical constant on n (-), b : empirical constant on n (-), c : empirical constant on μ_p (Pa sⁿ), d : empirical constant on μ_p (-), X : sludge concentration (g/L)

粘性パラメータの測定は, Murakami *et al.*⁸⁾や遠藤ら¹¹⁾の方法に従い, Figure 2に示した管型測定装置によって行った. この装置は円管内を移動する汚泥の平均流速(V_m)と圧力損失(ΔP)の関係を求めるものである. 循環の流量が低く管内を流れる平均流速が小さい条件では汚泥の流れは層流状態を呈する. この状態での V_m と ΔP の関係から(4)式に従って粘性パラメータを算出する¹⁹⁾.

$$\frac{\Delta P}{L} = 2^{n+2} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^n \frac{\mu_p V_m^n}{D^{n+1}} \quad (4)$$

Where, ΔP : trans-pressure (Pa), L : length (m), V_m : mean velocity in pipe (m/sec), D : diameter of pipe (m)

この測定装置は, 直径 16 mm の硬質 PVC 製パイプ, 差圧計(測定範囲 50 kPa), インバーター制御流量可変型定量ポンプ, 電磁流量計及び恒温装置から構成される. ポンプにより管路内の汚泥を循環し, 2.5 m の助走区間後の 1 m の区間の圧力差を測定した. それぞれの消化汚泥の温度は, ヒーターによって嫌気性消化槽と同じに保った.

Table 1に示した消化汚泥のうち, 汚泥濃度 19 g/L, 48 g/Lならびに 72 g/Lの中温消化汚泥を用いて得られた平均流速(V_m)と単位長さ当りの圧力損失($\Delta P/L$)の測定結果 (Figure 3) をもとに, 粘性パラメータの測定方法を説明する.

消化汚泥濃度が低い条件(19 g/L)では, $\Delta P/L$ のプロットは流速 $V_m=0.7$ m/sec で屈曲点を示し, これよ

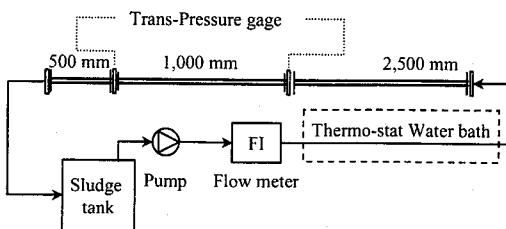


Figure 2 Experimental apparatus (Viscometer)

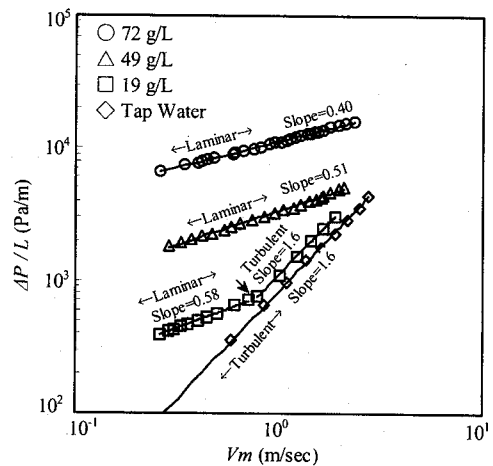


Figure 3 Identification of μ_p and n for mesophilic sludge from laminar flow area

り低い流速では, 直線の傾きは 1 より小さい 0.58 を示した. このことからこの汚泥は V_m が 0.7 m/sec より低い条件で層流状態を呈するものと判断した. また, 屈曲点よりも流速が速い範囲では直線の傾きは乱流を示す 1.6 が得られた. 水道水を用いた実験では測定した全流速範囲で傾きが 1 よりも大きく乱流状態を呈した.

汚泥濃度が高い条件(49 g/L, 72 g/L)では, どのプロットもひとつの直線上に表され, これらの傾きは 1 より小さかった. このことから, これらの汚泥は測定全ての範囲で層流状態を呈すると判断された. このようにしてグラフの傾きが 1 より小さい層流の範囲における測定結果から(4)式を使って汚泥の μ_p と n を求めた.

3 実験結果

(1) 中温と高温消化汚泥の濃度と構造粘度指数(n)の関係

汚泥濃度と構造粘度指数(n)の関係を求めた結果を Figure 4に示す.

中温消化の汚泥について, 実験範囲である汚泥濃度 19 g/L~72 g/L の範囲で, 汚泥濃度と Log(n)は直線関係を示した.

一方, 汚泥濃度と n の関係について 4~10 g/Lの臨界濃度を境に, n が急に変化して低濃度側で 1 に近づくことが報告されている^{11), 16), 20)}. このことは汚泥の粘性特性がこの臨界濃度を境に擬塑性流体($n <$

1)からニュートン流体($n = 1$)に変化することを意味する。既往の研究による中温消化汚泥におけるこの臨界濃度^(11), 16), 20) (4 g/L~10 g/L)をFigure 4に点線で図示した。

これに対し、本研究において高温消化汚泥ではニュートン流体と擬塑性流体の臨界濃度は約 40 g/L となり、中温消化汚泥に比べて数倍高い値が得られた。この高温消化汚泥の臨界濃度をFigure 4に図示した。

また、高濃度で擬塑性流体に変わった後の構造粘度指数(n)は高温消化汚泥と中温消化汚泥でほぼ等しく、汚泥濃度に対してほぼ同一の直線上にプロットされた。この汚泥濃度と構造粘度指数(n)の関係式(2)の係数 a は、中温消化汚泥では $a = 0.68(-)$ 、高温消化汚泥では $a = 0.66(-)$ となり、ほぼ等しい値になった。係数 b についても、中温消化汚泥と高温消化汚泥共に $b = 0.0069(-)$ となり、等しい値になった。

(2) 中温と高温消化汚泥の濃度と擬塑性粘度 (μ_p) の関係

次に汚泥濃度と擬塑性粘度(μ_p)の関係を求めた結果をFigure 5に示す。

中温消化の汚泥について、実験範囲である汚泥濃度 19 g/L~72 g/Lの範囲で、汚泥濃度と $\text{Log}(\mu_p)$ は直線関係を示した。

これに対し高温消化汚泥は、ニュートン流体と擬塑性流体の臨界濃度($X = 40$ g/L)を境に、 μ_p が急激に変化した。このため汚泥濃度と $\text{Log}(\mu_p)$ の関係は汚泥濃度 40 g/Lを境に濃い側と薄い側で2種類の直線によって表された。

汚泥濃度が 40 g/L以上の高濃度条件では高温消化汚泥の μ_p は中温消化汚泥の約半分であった。この汚泥濃度と擬塑性粘度(μ_p)の関係式(3)の係数 c は、中温消化汚泥では $c = 0.0184$ (Pa sⁿ)、高温消化汚泥では $c = 0.0095$ (Pa sⁿ)となり、高温消化汚泥は中温消化汚泥に比べ約 1/2 の値になった。直線の傾きを表す係数 d は、中温消化汚泥では $d = 0.071(-)$ 、高温消化汚泥では $d = 0.070(-)$ となり、ほぼ等しい値になった。

汚泥濃度が 40 g/L以上の高濃度条件では高温消化汚泥と中温消化汚泥で n の値はほぼ等しいものの、高温消化汚泥の μ_p は中温消化汚泥の約 1/2 であるため、見かけの粘度は高温消化汚泥では中温消化汚泥のおよそ半分になる。

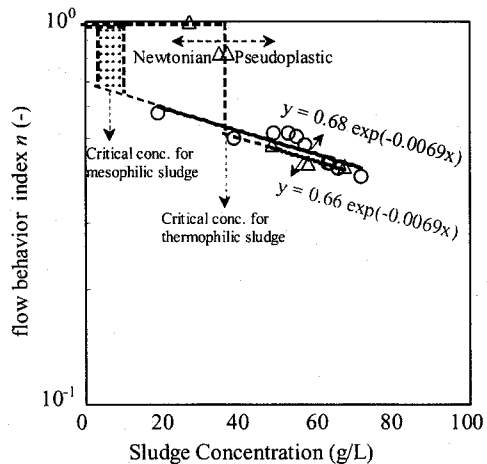


Figure 4 Identification of empirical constant n of mesophilic and thermophilic sludge. (○: mesophilic anaerobic digestion sludge, △: thermophilic anaerobic digestion sludge)

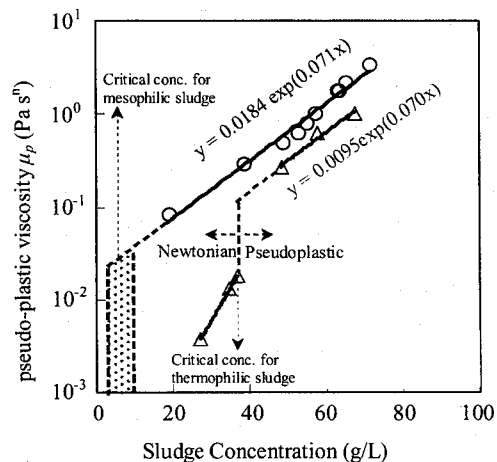


Figure 5 Identification of empirical constant μ_p of mesophilic and thermophilic sludge (○: mesophilic anaerobic digestion sludge, △: thermophilic anaerobic digestion sludge)

4 考察

(1) 高温消化プロセスで適用可能な汚泥濃度

Figure 4及びFigure 5に示したように中温と高温の消化汚泥の粘性特性は大きく異なった。このことから、中温消化汚泥のデータをもとに高温消化プロセスの嫌気性消化槽の攪拌混合を直接検討することは適切でないと考えられる。

高温消化汚泥は、汚泥濃度が 40 g/L 以上の高濃度消化条件では、同濃度の中温消化汚泥に比べ、粘

度が約半分になるため、高濃度消化に起因するアンモニア阻害のような生物学的な制限を別にすれば、より濃度の高い条件でもリアクターを運転可能である。そこで、上で得られた結果をもとに、中温消化汚泥と同じ粘度を示す高温消化汚泥の濃度をFigure 6に整理した。

同じ粘度になる汚泥濃度は高温消化汚泥の方が中温消化汚泥よりも 10 g/L ほど高い。よって、通常の高濃度消化の条件(汚泥濃度 > 30 g/L)で運転している中温消化の嫌気性消化槽は、高温消化に切り替えることによって、攪拌機のモーター容量を増強することなく、約 10 g/L の濃度を高めた運転が可能である。また、同じ濃度以下であれば、切り替える前よりも少ない投入動力で汚泥を攪拌混合することができると考えられる。

(2) 中温と高温消化汚泥の粘性の違いの要因

固形物を含む懸濁液では、懸濁物質の濃度、懸濁物質間の相互作用や液の粘度等が懸濁混合液の粘性に影響を与える。この中で粘度の温度依存性については、擬塑性流体について、ニュートン流体特性をもつ均一流体と同様に、(5)式に示す関係が成り立つことが実験的に確認されている²¹⁾。

$$\mu_p = A \cdot \exp(-B/T) \quad (5)$$

Where, A: constant (-), B: constant (-), T: temperature (K)

この式は液温の低下に伴い擬塑性粘性係数(μ_p)が指数的に増加することを示す。そこで中温消化汚泥に比べて高温消化汚泥の粘性が低い原因について温度の影響を把握するために、高温消化汚泥を冷やして粘性パラメータを中温消化汚泥と比較する追加実験をおこなった。この結果を(5)式に従って整理し、Figure 7にまとめた。

高温消化汚泥の μ_p は温度の低下に従ってわずかに増加するものの、中温条件(32℃)まで冷却しても $\mu_p = 1.3 \text{ Pa s}$ に留まり、中温消化汚泥の消化汚泥の $\mu_p = 2.2 \text{ Pa s}$ よりも明らかに小さかった。従って、高温消化汚泥の粘性が中温消化汚泥より低くなる現象には、水温よりも汚泥固形物の物性自体が強く影響していることがわかった。

一方、高温消化汚泥はニュートン流体から擬塑性流体に変化する臨界濃度が高く、中温消化汚泥に比べ高濃度での粘度が低かった。ニュートン流体から擬塑性流体へ変化は粒子間の相互作用が大きくなることで生じることから、この臨界濃度が高いことは粒子間の相互作用が弱いことを示している。また、

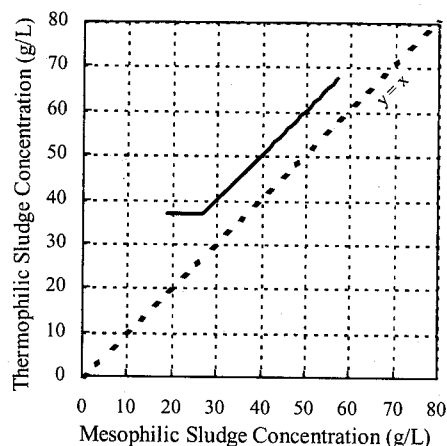


Figure 6 Thermophilic sludge concentration showing comparable viscosity to mesophilic sludge

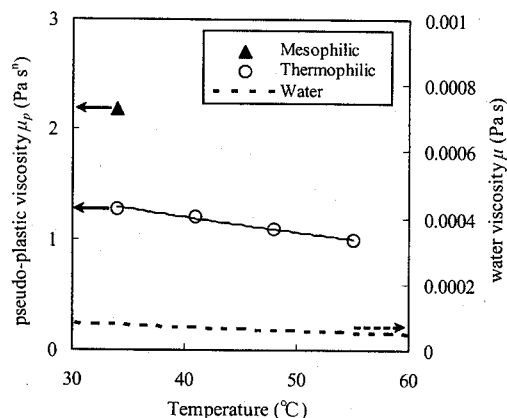


Figure 7 Temperature effect on sludge($X = 67 \text{ g/L}$) and water²²⁾ viscosity

同じ濃度での粘度が低いこともまた粒子間の相互作用が弱いことを示している。

この粘性の違いの原因の一つには、消化汚泥の微生物叢の違いに伴う固形物性状の違いが影響していると考えられる。本研究の高温と中温の消化汚泥の平均粒径はそれぞれ 20 μm および 32 μm であり、平均粒径が異なる。このことが粘度が異なる一因となっている可能性がある。更に、平均粒子径以外に汚泥粘性に影響を与える固形物性状としては、体積濃度、粒径分布、表面電荷、形状及び粘着力など²³⁾、²⁴⁾、²⁵⁾が考えられる。これらの影響について検討し、 n 及び μ_p の実験式に反映することは今後の課題である。

本研究で得られた消化汚泥の粘性パラメータと

既往の経験式をTable 2に整理した。それぞれ著者によって近似式が異なっており、固形物性状もほとんど記述していないものが多いため比較は困難であるものの、著しいものは μ_p が1桁程度以上異なっている。これは、上述のように経験式で用いられている汚泥の濃度以外に、粘性パラメータに強く影響を与える因子が存在する可能性を示唆している

5 結論

温度以外の条件が完全に等しい状態で運転した中温消化の消化汚泥と高温の消化汚泥を用い、それ

ぞれの粘性特性を比較した。この研究で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 高温消化汚泥は、中温に比べて、ニュートン流体から擬塑性流体に移移する臨界濃度が高濃度である。
- 2) 実験で用いた高温消化汚泥は、中温消化汚泥よりも粘性が低く、汚泥濃度がおよそ 30 g/L 以上では、中温消化汚泥よりも約 10 g/L 高い濃度で同程度の粘性になった。
- 3) 高温と中温の嫌気性消化汚泥の粘性の違いの要因は、高温消化汚泥は中温消化汚泥に比べ粒子間の相互作用が弱いためと考えられた。

Table 2 Available viscosity empirical modes for anaerobic digestion sludge

Reference	Viscosity model	Empirical equation	Viscometer	Sludge concentration (g/L)	Temp. (°C)
This study	P	Mesophilic sludge $\mu_p = 0.018 \cdot \exp(0.071 \cdot X)$, $n = 0.68 \cdot \exp(-0.0069 \cdot X)$	Pipe	19-72	33-35
		Thermophilic sludge $\mu_p = 0.0095 \cdot \exp(0.070 \cdot X)$, $n = 0.66 \cdot \exp(-0.0069 \cdot X)$	Pipe	48-67	50-53
Murakami, 2001 ⁸⁾	P	$\mu_p = 0.041 \cdot \exp(0.0959 \cdot X)$, $n = 0.521 \cdot \exp(-0.0102 \cdot X)$	Rotational	10.5-44.2	20
		$\mu_p = 0.104 \cdot \exp(0.0959 \cdot X)$, $n = 0.322 \cdot \exp(-0.0178 \cdot X)$	Pipe	10.5-44.2	20
Moeller, 1997 ¹⁴⁾	P	$\mu_p = 0.2758$, $n = 0.4268$	Rotational	10.5	Not available
遠藤, 1980 ¹¹⁾	P	$\mu_p = 6.16 \cdot 10^{-5} \cdot X^{1.76}$, $n = 2.27 \cdot X^{-0.329}$	Pipe	4-30	20-30
松原, 1993 ¹⁶⁾	P	$\mu_p = 5.19 \cdot 10^{-5} \cdot X^{2.87}$, $n = 2.03 \cdot X^{-0.473}$	Rotational	6.5-16	10-36
	B	$\tau_B = 0.00135 \cdot X^{2.32}$, $\eta_B = 0.000247 \cdot X^{1.32}$	Rotational	6.5-16	10-36
Lottio, 1997 ⁹⁾	P	$\mu_p = (-0.0024X - 0.0358)X + 0.021$ $n = (0.00011X - 0.0163)X - 0.876$ $\mu_p = 3.43 \cdot 10^{-5} \cdot X^{2.399}$, $n = 2.397 \cdot X^{-0.483}$	Rotational	12-76	20
	B	$\tau_B = (-0.000003X + 0.00099)X - 0.01$ $\eta_B = (0.00416X + 0.2406)X - 3.845$ $\tau_B = 0.000175 \cdot X^{1.302}$, $\eta_B = 0.0126 \cdot X^{1.856}$			
Slatter, 1997 ²⁶⁾	Y	$\tau_y = 13400 \frac{X^3}{0.425 - X}$, $\eta_y = \mu_w \left(1 - \frac{X}{0.425}\right)^{-35.3}$ $m = -0.0000156X^2 - 0.00459X + 1$	Rotational	31.7, 46.4, 66.2	35

P: Pseudoplastic; $\tau = \mu_p \left(\frac{du}{dy}\right)^n$; B: Bingham Plastics; $\tau = \tau_B + \eta_B \left(\frac{du}{dy}\right)$; Y: Yield Pseudoplastic; $\tau = \tau_y + \eta_y \left(\frac{du}{dy}\right)^m$

where, τ_B : yield stress for Bingham Plastics model (Pa), η_B : plastic viscosity for Bingham Plastics model (Pa s), τ_y : yield stress for Yield Pseudoplastic model (Pa), η_y : plastic viscosity for Yield Pseudoplastic model (Pa sⁿ), m : yield stress for Bingham Plastics model (Pa), μ_w : viscosity of water (Pa s)

記号

τ : shear stress (Pa)
 μ_p : pseudoplastic viscosity (Pa s)ⁿ
 n : flow behavior index for pseudoplastic model (-)
 $(-dv/dy)$: shear strain rate (s⁻¹)
 a : empirical constant on μ_p (-)
 b : empirical constant on μ_p (-)
 c : empirical constant on n (-)
 d : empirical constant on n (-)
 X : sludge concentration (g/L)
 ΔP : pressure difference (Pa)
 L : length (m)
 V_m : mean velocity in pipe (m/sec)
 D : diameter of pipe (m)
 τ_B : yield stress for Bingham Plastics model (Pa)
 η_B : plastic viscosity for Bingham Plastics model (Pa s)
 τ_Y : yield stress for Yield Pseudoplastic model (Pa)
 η_Y : plastic viscosity for Yield Pseudoplastic model (Pa sⁿ⁻¹)
 m : yield stress for Bingham Plastics model (Pa)
 μ_w : viscosity of water (Pa s)
 A : constant (-)
 B : constant (-)
 T : temperature (K)

謝辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)によるバイオマスエネルギー高効率転換技術開発プロジェクトの一環でおこなわれた。

参考文献

- 1) 藤島繁樹, 宮原高志, 水野修, 野池達也: 脱水汚泥の嫌気性消化に及ぼす固形物濃度の影響, 土木学会論文集, No.622/VII-11, pp.73-80, 1999.
- 2) Li Y.Y., Noike T., Katsumata K. and Koubayashi H.: Performance Analysis of the Full-scale Egg-Shaped Digester in Treating Sewage Sludge of High Concentration, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, pp.483-491, 1996.
- 3) Lu J. and Ahning B. K.: Effect of Temperature and Hydraulic Retention Time on Thermophilic Anaerobic Pretreatment of Sewage Sludge, *ADSW Conference Proceeding*, Vol. 1, pp. 159-164, 2005.
- 4) Clarence G. Golueke: Temperature Effects on Anaerobic Digestion of Raw Sewage Sludge, *Sew. and Ind. Wastes*, Vol. 30, No. 10, pp. 1225-1232, 1958.
- 5) 清原雄康, 宮原高志, 水野修, 野池達也, 李玉友: 高温嫌気性消化法を用いた高濃度下水汚泥の処理特性, 土木学会論文集, No. 622/VII-11, pp. 35-43, 1998.
- 6) U. S. Environ. Protect.: Agency Design Information Report. Anaerobic digester mixing systems, *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 59, No. 3, pp.162-170, 1987.
- 7) Buzzell J. and Sawyer C.: Biochemical vs. physical factors in digester failure, *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 35, No. 2, 1963.
- 8) Murakami H., Katayama H. and Matsuura H.: Pipe Friction Head Loss in Transportation of High-Concentration Sludge for Centralized Solid Treatment, *Water Environ. Research*, Vol. 73, No. 5, pp. 558-556, 2001.
- 9) Lotito V., Spinosa L., Minini G. and Antonacci R.: The rheology of sewage sludge at different steps of treatment, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 36, No. 11, pp. 79-5, 1997.
- 10) Rose-Innes I. H. and Nossel S.: The rheology and pumping of thickened activated sludge, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 15, No. 1, pp. 59-76, 1983.
- 11) 遠藤郁夫, 金成英夫: 下水汚泥の摩擦損失係数に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 301, pp. 71-82, 1980.
- 12) Frost R. C.: Sewage sludge pumping, *Water Serv.*, Vol. 87, No. 1051, 407-410, 1983.
- 13) Carthew G. A., Goehring C. A. and Van Teylingen J. E.: Development of dynamic head loss criteria for raw sludge pumping, *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 55, No. 5, pp. 472-483, 1983.
- 14) Moeller G. and Torres L. G.: Rheological Characterization of Primary and Secondary Sludge Treated by Both Aerobic and Anaerobic Digestion, *Bioresource Tech.*, Vol. 61, pp. 207-211, 1997.
- 15) 坂本勝, 室谷憲男, 李玉友, 野池達也: 下水処理余剰汚泥の嫌気消化に及ぼす高分子凝集剤の影響, 環境技術, Vol. 33, No. 8, pp. 61-68, 2004.
- 16) 松原誠, 渡部春樹, 佐藤和明, 笠井淳史: 下水汚泥の管路輸送における圧力損失の予測方法, 環境工学研究論文集, Vol. 30, pp. 257-266, 1993.
- 17) Sanin F. D.: Effect of solution chemistry on the rheological properties of activated sludge, *Water SA*, Vol. 28, No. 2, pp. 207-211, 2002.
- 18) Murakami H., Matsuura H. and Katayama H.: Study on pipe friction loss in high-concentration sludge transportation for centralized sludge treatment, *Prog. Water Pollut. Control Jpn (1998)*, pp. 108-120, 1998.
- 19) Nicholas P. Cheremisinoff, Editor: Rheology and Non-Newtonian Flows, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, vol. 7, 1986
- 20) Mulbarger M. C., Copas S. R., Kordic J. R. and Cash F. M.: Pipeline friction losses for wastewater sludges, *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 53, No. 8, pp. 1303-1313, 1981.
- 21) 井本立也: 概説レオロジー (上), pp. 27, 東京化学同人, 1963.
- 22) 本間仁, 安芸皎一: 物部水理学, pp. 4, 岩波書店, 1966.
- 23) 大垣真一郎, 松尾友矩: 高濃度懸濁液の流動特性について: 土木学会論文報告集, No. 210, pp. 21-32, 1973.
- 24) Forester, C. F.: The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludge, *Enzyme Microbiol. Technol.*, Vol. 30, pp. 349-345, 2003.
- 25) Seyssiecq I., Ferrasse J. H. and Roche N.: State-of-the-art: rheological characterization of wastewater treatment sludge, *Biochem. Eng. J.*, Vol. 16, pp. 41-56, 2003.
- 26) Slatter P. T.: The rheological characterisation of sludges, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 36, No. 11, pp. 9-18, 1997.

(2007. 5. 25 受付)

Rheological Characterization of Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion Sludge

Mitsuharu TERASIMA¹, Rajeev GOEL¹, Kazuya KOMATSU¹, Hidenari YASUI¹,
Hiroshi TAKAHASHI², Li Yu-You. Y³., Tatsuya NOIKE⁴

¹Kurita Water industries Ltd

²Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

³Department of Civil Engineering, Tohoku University

⁴Advanced research Institute, Nihon University

Rheological characteristics of anaerobically digested mesophilic and thermophilic sludge was studied using pipe-line pressure-drop measurement apparatus. Anaerobically digested mesophilic and thermophilic sludge samples were collected from anaerobic digesters operated at 35 °C and 55 °C respectively. Rheology of both the sludge was similar to pseudoplastic fluid and was modeled using power equation. The value of model parameters of pseudo-plastic viscosity (μ_p) and flow behavior index (n) were found to depend on sludge concentration (X). The empirical equations describing the relationship between sludge concentration and model parameters were $\mu_p=0.018e^{(0.071X)}$; $n=0.68e^{(-0.0069X)}$ for thermophilic sludge and $\mu_p=0.0095e^{(0.070X)}$; $n=0.66e^{(-0.0069X)}$ for mesophilic sludge. The value of μ_p for thermophilic sludge was found to be significantly lower than mesophilic sludge. Reducing the temperature from 55 °C to 32 °C during viscosity measurement of thermophilic sludge resulted in a μ_p value, which was still lower than the mesophilic sludge. These observations suggest that the characteristic of solid in sludge is more influential than temperature in governing the sludge viscosity. The lower viscosity of thermophilic sludge can be used to operate high rate anaerobic digestion process at high solid concentration without additional energy input.