

〈論文〉

嫌気性消化汚泥のチクソトロピー現象のモデル化

寺嶋 光 春¹⁾, 小手川 陽 子²⁾, 孫 夢³⁾
劉 兵^{1,4)}, 安井 英 斉¹⁾

¹⁾北九州市立大学国際環境工学部
(〒 808-0132 北九州市若松区ひびきの1-1 E-mail: m-terashima@kitakyu-u.ac.jp)

²⁾㈱日水コン
(〒 163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1 新宿スクエアタワー E-mail: kotegawa_y@nissuicon.co.jp)

³⁾北九州市立大学大学院国際環境工研究科
(〒 808-0132 北九州市若松区ひびきの1-1 E-mail: y7dac404@eng.kitakyu-u.ac.jp)

⁴⁾山東建築大学
(Fengming Rd., Lingang Development Zone, Jinan, China E-mail: 13801@sdjzu.edu.cn)

概 要

嫌気性消化槽の攪拌混合には槽内の汚泥のレオロジー特性が大きく影響を及ぼすと言われている。チクソトロピー性の擬塑性流体として振る舞う嫌気性消化汚泥の粘性を数式で表現することを目的とした。擬塑性粘度 μ_P および構造指数 n_P の両方がそれぞれ剪断付与によって時間変化する挙動を、剪断付与に伴いそれぞれのパラメータについてのチクソトロピーパラメータの減少速度がそれぞれ2次反応式に従い、その速度定数が剪断速度の累乗関数になるものとしてモデル化した。このモデルによるフィッティングは、剪断付与下の嫌気性消化汚泥の擬塑性粘度 μ_P および構造指数 n_P の両方の時間変化の測定結果に良好にあてはまった。

キーワード：擬塑性, 時間依存, 粘度, レオロジー, シミュレーション

原稿受付 2020.5.25 原稿受理 2020.8.5

EICA: 25(2・3) 70-78

1. はじめに

嫌気性消化槽では、投入した余剰汚泥と微生物を接触させること、pH や温度の均一化および死領域や短絡の防止を目的として、槽内の攪拌混合が行われる^{1,2)}。この攪拌混合には槽内の消化汚泥のレオロジー特性が大きく影響を及ぼすことが知られている²⁻⁴⁾。

非ニュートン性を示す高濃度の嫌気性消化汚泥の剪断速度と剪断応力の関係を示すレオロジー方程式としては、2つのレオロジーパラメータ（粘性定数 μ_P および構造指数 n_P ）を持つモデルである擬塑性流体モデル⁵⁻⁸⁾、2つのレオロジーパラメータ（降伏応力 τ_B および粘性定数 μ_B ）を持つモデルであるビンガム流体モデル⁹⁾、または3つのレオロジーパラメータ（降伏応力 τ_H 、粘性定数 μ_H および構造指数 n_H ）を持つモデルである Herschel-Bulkley (HB) モデル¹⁰⁻¹³⁾ が最も一般に用いられている。擬塑性流体モデルを用いて、汚泥濃度と粘性の関係を表現したとき、汚泥濃度の増加に伴い粘性定数 μ_P が増加すると同時に構造指数 n_P は減少することが報告されている^{14,15)}。この汚泥濃度増加に伴う構造指数 n_P の減少は固形物の物理的な相互作用の影響が大きくなり、非ニュートン性が大きく

なることを意味する。

また、排水処理で発生する嫌気性消化汚泥などの生物処理汚泥は、剪断の付与により懸濁固形物構造が破壊するため、一定以上の剪断を与え続けると時間とともに見かけ粘度が小さくなっていくチクソトロピー性を有すると言われている^{8,16-19)}。

チクソトロピー現象による粘性の時間変化の数式的表現として構造パラメータ λ ²⁰⁾ を用いるモデルが提案され、掘削泥水²¹⁾、血液²²⁾、含蠟原油²³⁾、マヤ原油²⁴⁾、生コンクリート²⁵⁾ などの実際的な物質についても研究が行われている。 λ は剪断付与によるフロック構造の破壊度合いによって、0（完全に崩れている）から1（完全に構造化されている）までの値を取る。レオロジーパラメータと構造パラメータ λ との関連付けとしては、 λ の関数として、降伏応力^{26,27)}、ビンガム粘度²⁸⁾、あるいは降伏応力とビンガム粘度のそれぞれを対象とした表現^{29,30)}、剪断応力全体^{31,32)} を対象とした表現がある。これらを応用し構造パラメータ λ の関数とし表された粘性表現を数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) と組み合わせ用いてチクソトロピー現象による粘性変化の流動への影響を検討した研究^{27,33)} がある。

嫌気性消化槽の処理性能の確保のためには混合が重

要³⁴⁾であり、CFD手法を用いると混合均一化時間や槽内の速度分布の予測が可能となることから、嫌気性消化槽の混合の検討にCFD手法を用いた研究が多く行われている³⁵⁻³⁷⁾。CFDを用いて嫌気性消化槽の攪拌停止や攪拌再開後の槽内の混合の様子を再現できれば、入口から出口への短絡流の発生など混合に関するトラブルを防止しつつ攪拌のエネルギーを削減する検討に役立つものと考えられる。例えば、間欠的な原泥投入を行い、これに合わせて必要十分な時間のみ間欠的な攪拌をして均一化ができれば、均一化完了後も漫然と攪拌を継続しなくても済むため攪拌に要するエネルギーの節約になる。

汚泥の粘性特性をCFDで考慮するために、汚泥濃度による擬塑性粘度 μ_P および構造指数 n_P の違いを含めた混合の研究^{2,3)}がある。しかしながら嫌気性消化汚泥のチクソトロピー性についての研究は、定性的にチクソトロピー性に言及した研究結果⁸⁾や、粘弾性的挙動に焦点を当てた研究^{38,39)}や、粘性の時間変化の数式的表現として特定の剪断速度での見かけ粘度の時間変化を時間の指数関数として表した研究⁴⁰⁾があるのみで、レオロジー方程式全体の時間変化を数式で表現するには至っていない。CFDを用いて嫌気性消化槽の攪拌停止や攪拌再開後の槽内の混合の様子を再現するためには嫌気性消化汚泥について剪断による粘性の時間変化の数式的表現が必要である。

そこで、本研究ではチクソトロピー性擬塑性流体として振る舞う嫌気性消化汚泥のレオロジーパラメータを数式で表現することを目的とし、擬塑性粘度 μ_P および構造指数 n_P の両方がそれぞれ剪断付与によって時間変化する挙動を測定し、その現象のモデル化を試みた。

2. 方法

2.1 嫌気性消化汚泥

測定に用いた嫌気性消化汚泥はK市H浄化センターで運転中の中温嫌気性消化槽から採取した。本浄化センターは、一部合流を含む分流式であり、消化槽に投入しているのは、機械濃縮した余剰汚泥、重力濃縮した初沈汚泥およびし尿である。

採取した嫌気性消化汚泥は濃度12.4 g/Lであり(MLSSとして測定⁴¹⁾)、VSS/SS比は0.745だった。嫌気性消化汚泥がニュートン性から非ニュートン性に遷移する臨界的な汚泥濃度は10 g/L程度であるといわれている¹⁴⁾。本研究は、非ニュートン性やチクソトロピー性が生じるこれよりも高い汚泥濃度とするために、これを濃縮して試料を調整した。また、一般的な高濃度消化の濃度よりも高い、セミドライ(37~47 g/L、平均42 g/L)⁴²⁾や超高濃度消化(58 g/L)⁴³⁾と

呼ばれる汚泥濃度領域について検討することにした。採取した嫌気性消化汚泥を遠心分離(温度2℃)によって約80 g/Lに濃縮した後、純水を用いて2種類の濃度(42 g/Lおよび62 g/L)に調整した。これをレオメータの円筒に充填した状態で静置し、30分間ウォーターバス(35℃)に浸漬して温度を調整した後レオロジー測定をおこなった。

2.2 装置

レオロジー測定には、LamyRheology社製レオメータRM100およびスピンドルセットMS-DIN 11を用いた。

スピンドル回転数を段階的に増加させることにより剪断速度を段階的に増加させたときの剪断応力変化を測定し剪断速度と剪断応力の関係を得た(レオロジー測定)。レオロジー測定は一つの剪断速度で3回の応力測定を行いその平均値を測定値とした。また、レオロジー測定と同じ装置をそのまま用いて、長時間剪断を付与してチクソトロピー現象を発生させた。

2.3 剪断付与によるチクソトロピー性発現

長時間、剪断が与えられたときのレオロジーパラメータの変化を測定するために、一定のスピンドル回転数で長時間にわたり剪断を付与した後、レオロジー測定を実施した。一定回転数で、0.5 hrの時間剪断付与後、レオロジー測定を行い、再度剪断付与しレオロジー測定を行うことを繰り返した。これにより剪断付与時間を加算させた。剪断付与時間 t は0.5 hrから0.5 hr間隔で2.5 hrまでとした。一定回転数での剪断付与条件として、剪断速度 387 s^{-1} 、 904 s^{-1} および 1936 s^{-1} の3通り(スピンドル回転数としては、それぞれ 300 min^{-1} 、 700 min^{-1} および 1500 min^{-1})とした。

2.4 レオロジー方程式

高濃度の嫌気性消化汚泥の剪断速度と剪断応力の関係を示すレオロジー方程式としては、式(1)に示す擬塑性流体モデル⁵⁻⁸⁾、式(2)に示すビンガム流体モデル⁹⁾、または式(3)に示すHerschel-Bulkley (HB)モデル¹⁰⁻¹³⁾が使用されている。

$$\tau = \mu_P \gamma^{n_P} \quad (1)$$

$$\tau = \tau_B + \mu_B \gamma \quad (2)$$

$$\tau = \tau_H + \mu_H \gamma^{n_H} \quad (3)$$

ここで、 τ : 剪断応力、 γ : 剪断速度、 μ_P : 擬塑性流体モデルの粘性定数(擬塑性粘度)、 n_P : 擬塑性流体モデルの構造指数(擬塑性構造指数)、 τ_B : ビンガム流体モデルの降伏応力、 μ_B : ビンガム流体モデルの粘

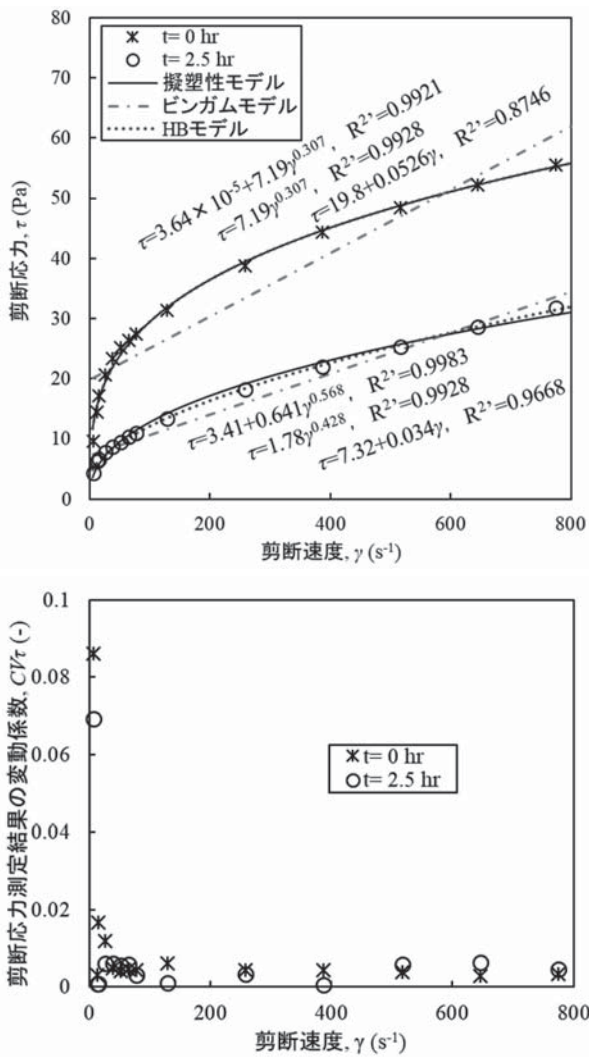


Fig. 1 Upper : A example of rheology curves before and after sheared and these fitting results, Lower ; The coefficient of variation for each measurement

性定数, τ_H : HB モデルの降伏応力, μ_H : HB モデルの粘性定数, n_H : HB モデルの構造指数である。測定で得た剪断速度と剪断応力の関係プロットは MATLAB[®] の fit 関数を用いて、各レオロジー方程式のあてはめを行った。レオロジー測定およびあてはめの例として、濃度 43 mg/L, $t=0$ hr (剪断付与前) および $t=2.5$ hr の結果を Fig. 1 上に示す。また一つの剪断速度での 3 回の応力測定の変動係数を Fig. 1 下に示す。ビンガムモデルは、測定結果とあてはめた直線が大きく異なり、測定結果を表現するために不適切であった。HB モデルであてはめても降伏応力が小さく決定されたため、擬塑性モデルでも同様に測定結果をよく再現した。自由度調整済み決定係数は、両者共に 1 に近くなった。このため解析の簡単のためレオロジーパラメータ数の少ない擬塑性モデルを採用することにした。

2.5 チクソトロピーモデル

剪断付与に伴う懸濁固形物の構造破壊による粘性の減少を数式的に表現するために、前述のようにチクソトロピーパラメータが導入されており、そのレオロジー方程式への関与として研究者により様々な表現がされている⁴⁴。本研究では、擬塑性モデルの二つのパラメータのそれぞれにチクソトロピーパラメータが関与するものとしてモデル化した。擬塑性粘度 μ_P に対するチクソトロピーパラメータ λ については、Hammadi らの解析³²)と同様、剪断履歴がない初期の粘度に対する時間 t の剪断後の粘度の比として、式(4)の通りに定義した。擬塑性構造指数 n_P に対するチクソトロピーパラメータ κ については、擬塑性粘度 μ_P に対するチクソトロピーパラメータ λ と同様であるが、大きな非ニュートン性を示す 0 に近い値から剪断付与に伴い 1 に近づくという特徴から、1 との差の比として、式(5)の通りに定義した。

$$\lambda(t) = \frac{\mu_{P(t)}}{\mu_{P0}} \quad (4)$$

$$\kappa(t) = \frac{1 - n(t)}{1 - n_0} \quad (5)$$

ここで、 λ : 擬塑性粘度に対するチクソトロピーパラメータ(-), κ : 擬塑性構造指数に対するチクソトロピーパラメータ(-), μ_{P0} : 剪断付与前の擬塑性粘度 (Pa sⁿ) および n_0 : 剪断付与前の擬塑性指数(-)である。以上の定義より、チクソトロピーパラメータ λ および κ は初期値 1 から剪断付与に伴い減少し一定値に近づく。チクソトロピーパラメータ λ および κ の剪断付与に伴う減少速度は、Hammadi らの解析³²)と同様、2次反応式に従い、その速度定数は剪断速度の累乗関数になるものとして式(6) および式(7)の通りモデル化した。

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\alpha_\lambda \gamma^{\beta_\lambda} (\lambda - \lambda_e)^2 \quad (6)$$

$$\frac{d\kappa}{dt} = -\alpha_\kappa \gamma^{\beta_\kappa} (\kappa - \kappa_e)^2 \quad (7)$$

ここで、 α_λ , β_λ , λ_e : λ に対する速度論パラメータ, α_κ , β_κ , κ_e : κ に対する速度論パラメータである。

式(6) および式(7)の微分方程式をそれぞれの初期条件 ($t=0$ で $\lambda=1$ および $\kappa=1$) の元で解き、式(4) および式(5)に代入して式(8) および式(9)を得る。

$$\mu_{P(t)} = \mu_{P0} \left(\frac{\alpha_\lambda (1 - \lambda_e) \lambda_e \gamma^{\beta_\lambda} t + 1}{\alpha_\lambda (1 - \lambda_e) \gamma^{\beta_\lambda} t + 1} \right) \quad (8)$$

$$n_{P(t)} = 1 - (1 - n_0) \left(\frac{\alpha_\kappa (1 - \kappa_e) \kappa_e \gamma^{\beta_\kappa} t + 1}{\alpha_\kappa (1 - \kappa_e) \gamma^{\beta_\kappa} t + 1} \right) \quad (9)$$

ここで、 t : 剪断付与時間である。式(8) および式(9)を用い、最小二乗法により速度論的パラメータを決定し、任意の剪断速度 γ で、剪断付与時間 t の時間、剪断付与した後の擬塑性粘度 μ_P および擬塑性構造指数 n_P の値を計算した。

3. 結 果

濃度 42 g/L の嫌気性消化汚泥について、3通りの剪断強度 (387 s^{-1} , 904 s^{-1} および 1936 s^{-1}) を付与したときの剪断時間ごとのレオロジー曲線を **Fig. 2** 上、**Fig. 2** 中および **Fig. 2** 下にそれぞれ示す。濃度 62 g/L の嫌気性消化汚泥についても同様に3通りの剪断強度 (387 s^{-1} , 904 s^{-1} および 1936 s^{-1}) を付与したときの剪断時間ごとのレオロジー曲線を **Fig. 3** 上、**Fig. 3** 中および **Fig. 3** 下にそれぞれ示す。濃度 42 g/L および濃度 62 g/L 共に、剪断付与時間 t の増加に伴い剪断速度に対する剪断応力の大きさは減少し、チクソトロピー性が確認できた。また、剪断付与時の剪断速度が大きいほどこの減少が大きかった。各レオロジー曲線測定結果をそれぞれ擬塑性モデル (式(1)) にあてはめ、二つのパラメータ (擬塑性粘度 μ_P および擬塑性構造指数 n_P) を得た。このあてはめた計算結果を **Fig. 2** および **Fig. 3** に合わせて示した。

剪断付与時の各剪断速度ごとに、剪断付与時間 t に対する擬塑性粘度 μ_P および擬塑性構造指数 n_P の変化を、濃度 42 g/L および濃度 62 g/L それぞれ、**Fig. 4** および **Fig. 5** に示す。プロットのエラーバーはレオロジーモデルあてはめにおける95%の信頼限界の範囲を示している。濃度 42 g/L および濃度 62 g/L 共に、剪断付与時間が大きくなると擬塑性粘度 μ_P は減少した。その減少幅は徐々に小さくなった。剪断付与時間が大きくなると擬塑性構造指数 n_P は増加した。その増加幅は徐々に小さくなった。

この剪断付与による擬塑性粘度 μ_P および擬塑性構造指数 n_P の時間変化を式(8) および式(9)を用いて計算した結果を **Fig. 4** および **Fig. 5** に合わせて示す。濃度 42 g/L および濃度 62 g/L 共に、剪断付与による擬塑性粘度 μ_P および擬塑性構造指数 n_P の時間変化は、式(4) から式(7) のモデルでフィッティングできた。速度論パラメータの一覧を **Table 1** に示す。

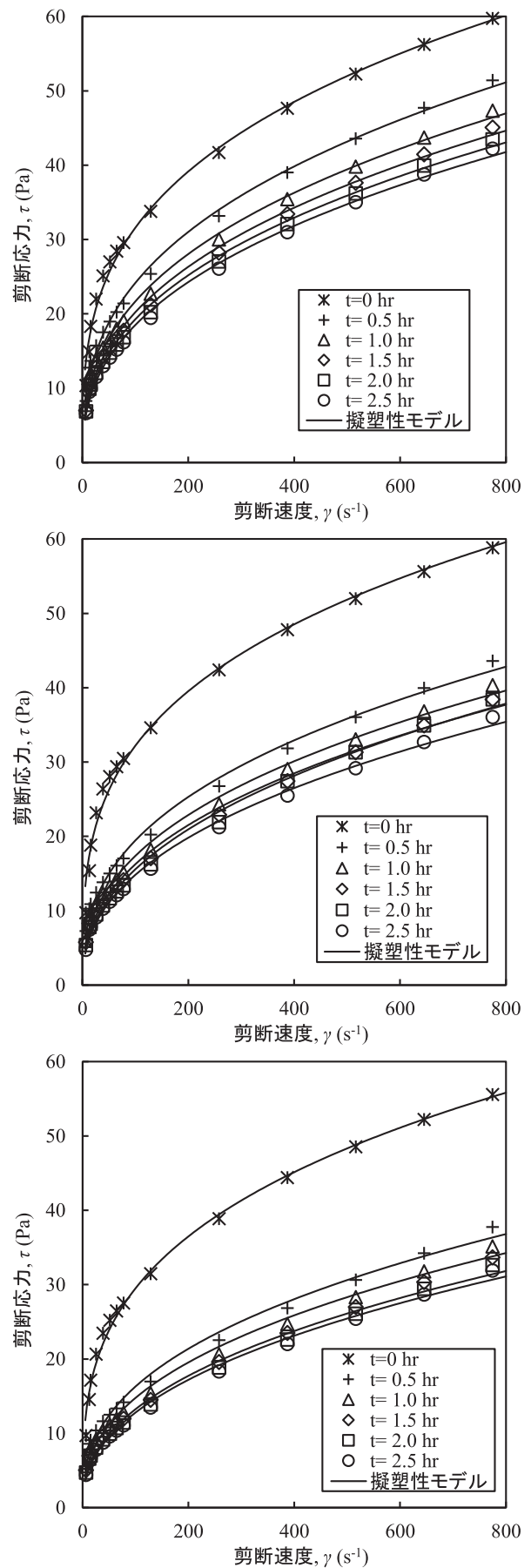


Fig. 2 Measured rheology curves after sheared ; sludge conc, 42 g/L (upper, $\gamma=387 \text{ s}^{-1}$; middle, $\gamma=904 \text{ s}^{-1}$ and lower, $\gamma=1936 \text{ s}^{-1}$)

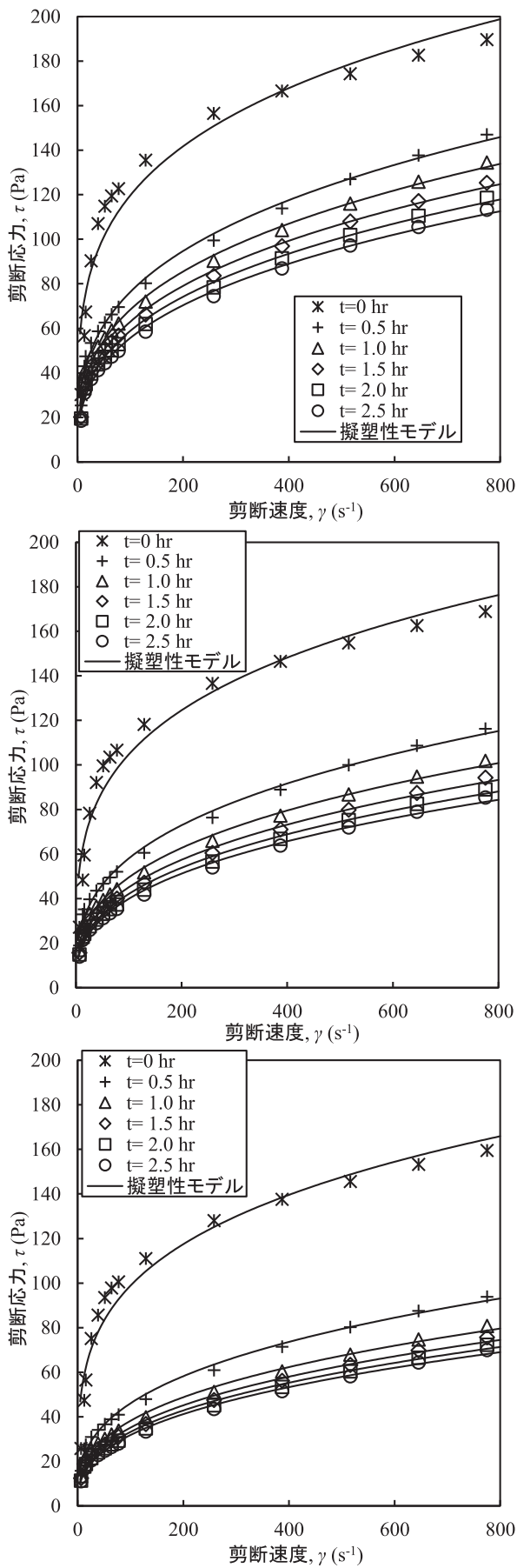


Fig. 3 Measured rheology curves after sheared; sludge conc. 62 g/L (upper, $\gamma=387 \text{ s}^{-1}$; middle, $\gamma=904 \text{ s}^{-1}$ and lower, $\gamma=1936 \text{ s}^{-1}$)

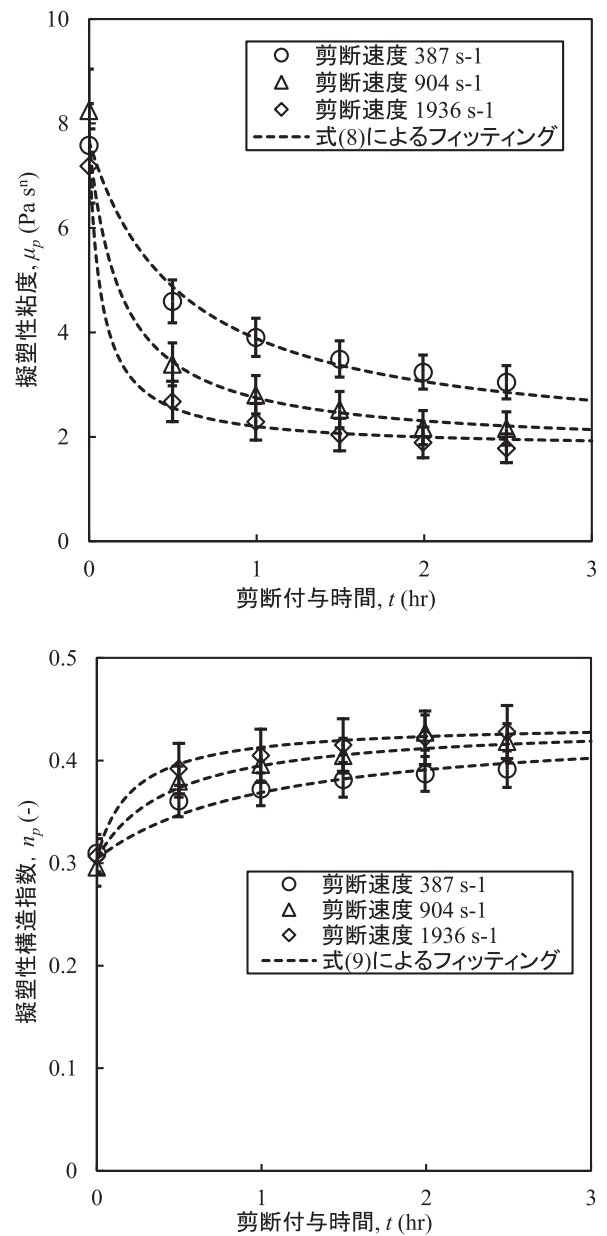


Fig. 4 The relationship between sheared time and two pseudoplastic parameters with 95% confidence bounds; sludge conc. 42 g/L (upper; pseudoplastic viscosity, μ_p and lower; pseudoplastic index, n_p)

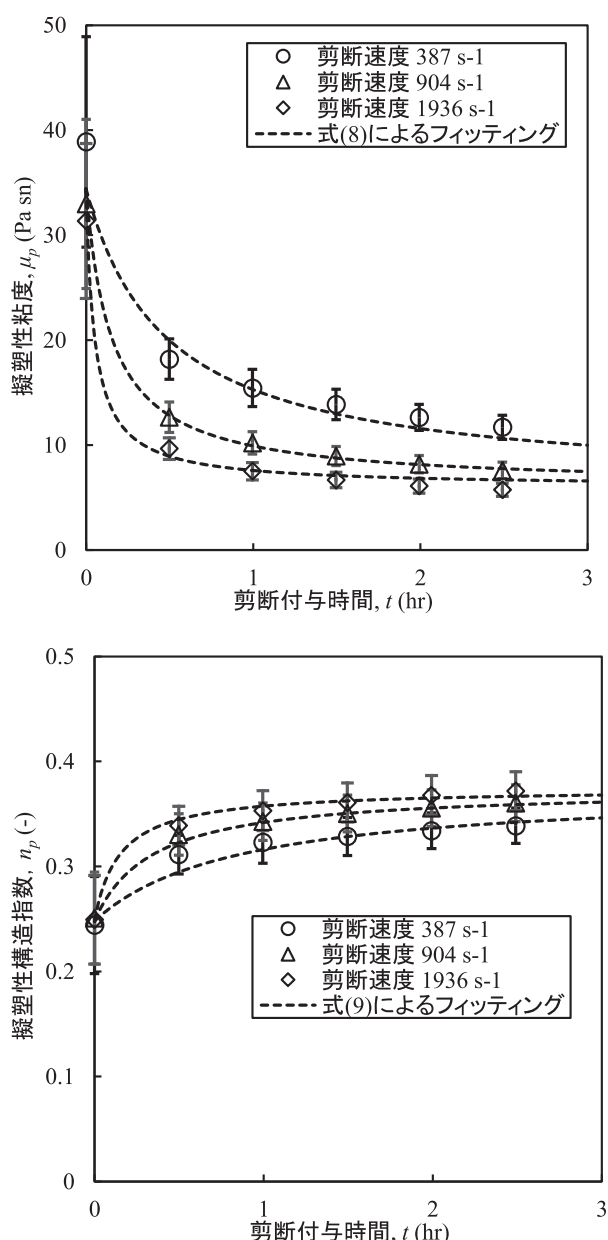


Fig. 5 The relationship between sheared time and two pseudoplastic parameters with 95% confidence bounds; sludge conc. 62 g/L (upper; pseudoplastic viscosity, μ_p and lower; pseudoplastic index, n_p)

Table 1 kinetic parameters for thixotropy simulation

Sludge conc.	42 [g/L]		62 [g/L]	
	λ	κ	λ	κ
α_λ or α_κ	0.00171	0.0155	0.00101	0.0127
β_λ or β_κ	1.21	0.969	1.31	1.06
λ_e or κ_e	0.231	0.810	0.176	0.832
Adjusted R-square	0.963	0.861	0.940	0.845

4. 考 察

嫌気性消化汚泥について、報告されている^{8,40)}のと同じく、**Fig. 2** および **Fig. 3** で示したように本研究でも剪断付与による粘性の減少すなわちチクソトロピー

性が確認された。さらに本研究では **Fig. 4** および **Fig. 5** に示すように、 μ_p だけでなく μ_p と n_p の両方が剪断付与によって変化することが明らかとなった。従来のモデル化のように降伏応力^{26,27)}、ビンガム粘度²⁸⁾、あるいは降伏応力とビンガム粘度のそれぞれを対象とした表現^{29,30)}、剪断応力全体^{31,32)}を対象とした表現では、擬塑性構造指数 n_p は時間変化しないため、今回実験で明らかになった現象を再現することができない。本研究では μ_p と n_p の両方がそれぞれチクソトロピーパラメータ λ および κ の関数になるものとしてモデル化し、剪断付与による時間変化を表現し、実験結果にフィッティングできた。

本研究結果では、異なる3通りの強度で剪断付与した系で同一のチクソトロピーの速度論的パラメータを得た。これは、採取し濃縮等操作を行った後に分取した、全く同じ履歴を持つ汚泥試料を用いたことが大きく寄与していると考えられ、異なる季節に採取し同様の操作を行った試料やチクソトロピーの測定を行った測定済み試料を用いて再度測定を行ったものは異なる測定結果になる傾向を予備試験で得ている。このことから、汚泥の履歴や性状のわずかな違いがチクソトロピーの測定結果に大きく影響を及ぼすと予想される。本研究のモデルはチクソトロピー性を定量的に把握できるため、特性の季節的な違いや履歴による違い、処理場による違いなどを詳細に検討し特徴づけるのに役立つものと考えられる。

本研究では超高濃度嫌気性消化と呼ばれる領域の二つの汚泥濃度に本モデルを適用しそれぞれ異なる速度論的パラメータを得た。これらのパラメータは汚泥濃度に関係する値になると予想され、その関連性を調べることは今後の重要な課題である。また、一般的な高濃度消化である30 g/L~35 g/L程度^{45,46)}といった今回の測定とは異なる範囲の汚泥濃度についても同じように本モデルが適用できるか今後検討する必要がある。

本研究では剪断付与により粘性が下がっていく現象(チクソトロピー)を表現し、実験結果にフィッティングできたが、チクソトロピー性を有する液体は剪断休止によって再構造化し粘度が増加していくといわれている。この再構造化をモデル化する、つまり、一定以下の剪断条件下では λ および κ が増加して速度も含めたモデルを構築することでより実用的なモデルとすることができると考えられ今後の課題である。

本研究では、式(6) および式(7) の通りチクソトロピーパラメータ λ および κ の剪断による減少を反応速度式として定義して解析を行ったが、CFDモデルでの利用においてはチクソトロピーパラメータ λ および κ を液体と共に移動する変数として定義し、 λ および κ について移流拡散の方程式をそれらの反応速度式と組み合わせて反応移流拡散方程式として解くことで、

槽内の嫌気性消化汚泥の粘性の変化を考慮した計算が可能になるものと考えられる。

5. ま と め

本研究では、チクソトロピー性の擬塑性流体として振る舞う嫌気性消化汚泥の粘性を数式で表現することを目的とし、擬塑性粘度 μ_P および構造指数 n_P の両方がそれぞれ剪断付与によって時間変化する挙動を、剪断付与に伴うチクソトロピーパラメータ λ , κ の減少速度がそれぞれ2次反応式に従い、その速度定数が剪断速度の累乗関数になるものとしてモデル化した。このモデルによるフィッティングは、剪断付与下の嫌気性消化汚泥の擬塑性粘度 μ_P および構造指数 n_P の両方の時間変化の測定結果に良好にあてはまった。

参 考 文 献

- 1) E. P. Agency: EPA Design Information Report-anaerobic digester mixing systems, J. Water Pollut. Control Fed., Vol. 59, pp. 162-170 (1987)
- 2) 寺嶋光春, 小松和也, 安井英斉, ラジブゴエル, 井上千弘, 須藤孝一, 李玉友, 野池達也: 高濃度嫌気性消化槽の混合における均一化時間の検討, 土木学会論文集 G, Vol. 66, No. 3, pp. 103-110 (2010)
- 3) M. Terashima, R. Goel, K. Komatsu, H. Yasui, H. Takahashi, Y. Y. Li and T. Noike: CFD simulation of mixing in anaerobic digesters, Bioresource Technology, Vol. 100, No. 7, pp. 2228-2233 (2009)
- 4) P. Wang, T. Reviol, H. Ren and M. Böhle: Experimental investigation of the mixing characteristics of non-Newtonian fluids through an ultrasonic Doppler anemometer (UDA), Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 109, pp. 109866 (2019)
- 5) J. Ho and S. Sung: Effects of solid concentrations and cross-flow hydrodynamics on microfiltration of anaerobic sludge, Journal of Membrane Science, Vol. 345, No. 1-2, pp. 142-147 (2009)
- 6) Y. Fubin, L. Zifu, M. Huanhuan, X. Lei, B. Xiaofeng and Y. Yi: Experimental study on rheological characteristics of high solid content sludge and its mesophilic anaerobic digestion, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 5, No. 4, pp. 1-17 (2013)
- 7) G. Moeller and L. G. Torres: Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion, Bioresource Technology, Vol. 61, No. 3, pp. 207-211 (1997)
- 8) P. Battistoni, G. Fava, C. Stanzini, F. Cecchi and A. Bassetti: Feed characteristics and digester operative conditions as parameters affecting the rheology of digested municipal solid wastes, Water Science and Technology, Vol. 27, No. 2, pp. 37-45 (1993)
- 9) M. M. Sozanski, E. S. Kempa, K. Grocholski and J. Bien: The rheological experiment in sludge properties research, Water Science and Technology, Vol. 36, No. 11, pp. 69-78 (1997)
- 10) S. Zhang, J. Liang, J. Huang, S. Huang, L. Zheng, S. Sun, Z. Zhong, X. Zhang, X. Yu and Z. Guan: Analysis of the relationship of extracellular polymeric substances to the dewaterability and rheological properties of sludge treated by acidification and anaerobic mesophilic digestion, Journal of Hazardous Materials, Vol. 369, pp. 31-39 (2019)
- 11) J. Liu, D. Yu, J. Zhang, M. Yang, Y. Wang, Y. Wei and J. Tong: Rheological properties of sewage sludge during enhanced anaerobic digestion with microwave-H₂O₂ pretreatment, Water Research, Vol. 98, pp. 98-108 (2016)
- 12) X. Feng, B. Tang, L. Bin, H. Song, S. Huang, F. Fu, J. Ding, C. Chen and C. Yu: Rheological behavior of the sludge in a long-running anaerobic digester: Essential factors to optimize the operation, Biochemical Engineering Journal, Vol. 114, pp. 147-154 (2016)
- 13) Y. Li, Z. Song, Y. Yuan, Q. Zhang and H. Zhu: Rheology improvement in an osmotic membrane bioreactor for waste sludge anaerobic digestion and the implication on agitation energy consumption, Bioresource Technology, Vol. 295, pp. 122313 (2020)
- 14) 寺嶋光春, G. Rajeev, 小松和也, 安井英斉, 高橋弘, 李玉友, 野池達也: 中温と高温の嫌気性消化汚泥の粘性特性の比較, 環境工学研究論文集, Vol. 44, pp. 687-694 (2007)
- 15) H. Murakami, H. Katayama and H. Matsuura: Pipe Friction Head Loss in Transportation of High-Concentration Sludge for Centralized Solids Treatment, Water Environment Research, Vol. 73, No. 5, pp. 558-566 (2001)
- 16) N. Tixier, G. Guibaud and M. Baudu: Determination of some rheological parameters for the characterization of activated sludge, Bioresource Technology, Vol. 90, No. 2, pp. 215-220 (2003)
- 17) N. Tixier, G. Guibaud and M. Baudu: Effect of pH and ionic environment changes on interparticle interactions affecting activated sludge flocs: A rheological approach, Environmental Technology, Vol. 24, No. 8, pp. 971-978 (2003)
- 18) J. C. Baudez: Physical Aging and Thixotropy in Sludge Rheology, Applied Rheology, Vol. 18, No. 1, pp. 13495-13491-13495-13498 (2008)
- 19) J. C. Baudez: About peak and loop in sludge rheograms, Journal of Environmental Management, Vol. 78, No. 3, pp. 232-239 (2006)
- 20) C. F. Goodeve: A general theory of thixotropy and viscosity, Transactions of the Faraday Society, Vol. 35, pp. 342-358 (1939)
- 21) H. J. Skadsem, A. Leulseged and E. Cayeux: Measurement of Drilling Fluid Rheology and Modeling of Thixotropic Behavior, Applied Rheology, Vol. 29, No. 1, pp. 1-11 (2019)
- 22) J. S. Horner, M. J. Armstrong, N. J. Wagner and A. N. Beris: Investigation of blood rheology under steady and unidirectional large amplitude oscillatory shear, Journal of Rheology, Vol. 62, No. 2, pp. 577-591 (2018)
- 23) H. Teng and J. Zhang: A new thixotropic model for waxy crude, Rheologica acta, Vol. 52, No. 10, pp. 903-911 (2013)
- 24) S. Mortazavi-Manesh and J. M. Shaw: Thixotropic Rheological Behavior of Maya Crude Oil, Energy & Fuels, Vol. 28, No. 2, pp. 972-979 (2014)
- 25) N. Roussel: A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 10, pp. 1797-1806 (2006)
- 26) Q. Nguyen and D. Boger: Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspensions, Rheologica acta, Vol. 24, No. 4, pp. 427-437 (1985)

- 27) C. M. Bui and T. X. Ho : Numerical study of an unsteady flow of thixotropic liquids past a cylinder, *AIP Advances*, Vol. 9, No. 11 (2019)
- 28) W. Worrall and S. Tuliani : Viscosity changes during the ageing of clay-water suspensions, *Trans Brit Ceramic Soc*, Vol. 63, pp. 167-185 (1964)
- 29) E. A. Toorman : Modelling the thixotropic behaviour of dense cohesive sediment suspensions, *Rheologica acta*, Vol. 36, No. 1, pp. 56-65 (1997)
- 30) D. De Kee, R. Code and G. Turcotte : Flow properties of time-dependent foodstuffs, *Journal of Rheology*, Vol. 27, No. 6, pp. 581-604 (1983)
- 31) C. Tiu and D. Boger : Complete rheological characterization of time - dependent food products, *Journal of texture studies*, Vol. 5, No. 3, pp. 329-338 (1974)
- 32) L. Hammadi, A. Ponton and M. Belhadri : Temperature effect on shear flow and thixotropic behavior of residual sludge from wastewater treatment plant, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 17, No. 3, pp. 401-412 (2012)
- 33) C. M. Bui and T. X. Ho : Influence of thixotropic parameters on a non-Newtonian fluid flow, *AIP Advances*, Vol. 10, No. 3 (2020)
- 34) I. D. Kariyama, X. Zhai and B. Wu : Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review, *Water Research*, Vol. 143, pp. 503-517 (2018)
- 35) L. Mao, J. Zhang, Y. Dai and Y. W. Tong : Effects of mixing time on methane production from anaerobic co-digestion of food waste and chicken manure : Experimental studies and CFD analysis, *Bioresource Technology*, Vol. 294, pp. 122-177 (2019)
- 36) G. Leonzio : Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digesters using CFD analysis, *Renewable Energy*, Vol. 123, pp. 578-589 (2018)
- 37) C. Sadino-Riquelme, R. E. Hayes, D. Jeison and A. Donoso-Bravo : Computational fluid dynamic (CFD) modelling in anaerobic digestion : General application and recent advances, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 39-76 (2018)
- 38) J. C. Baudez, R. K. Gupta, N. Eshtiaghi and P. Slatter : The viscoelastic behaviour of raw and anaerobic digested sludge : strong similarities with soft-glassy materials, *Water Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 173-180 (2013)
- 39) J. C. Baudez, F. Markis, N. Eshtiaghi and P. Slatter : The rheological behaviour of anaerobic digested sludge, *Water Research*, Vol. 45, No. 17, pp. 5675-5680 (2011)
- 40) X. Cao, K. Jiang, X. Wang and G. Xu : Effect of total suspended solids and various treatment on rheological characteristics of municipal sludge, *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 44, No. 9, pp. 5123-5138 (2018)
- 41) 日本下水道協会 : 下水試験方法 2012 年版上巻, (2012)
- 42) 西井啓典, 片岡直明, 樋口真也 : 高効率ガス回収型汚泥消化装置の開発 —— セミドライメタン[®] 発酵装置, *エバラ時報 = Ebara engineering review*, No. 253, pp. 18-22 (2017)
- 43) 高島正信, 中尾総一 : 下水汚泥の超高濃度嫌気性消化とアンモニア除去/回収, *土木学会論文集 G (環境)*, Vol. 72, No. 7, pp. III_117-III_124 (2016)
- 44) A. Mujumdar, A. N. Beris and A. B. Metzner : Transient phenomena in thixotropic systems, *Journal of Non-Newtonian fluid mechanics*, Vol. 102, No. 2, pp. 157-178 (2002)
- 45) 島田正夫, 池上梓, 澤原大道, 橋本悠司 : 高濃度対応型ろ過濃縮・中温消化システムの開発, 第 55 回下水道研究発表会講演要旨集, pp. 1124-1126 (2018)
- 46) 島田正夫, 林梓, 澤原大道, 橋本悠司 : 高濃度対応型ろ過濃縮・中温消化システムの開発, 第 56 回下水道研究発表会講演要旨集, pp. 1211-1213 (2019)

A Thixotropy Model for Anaerobically Digested Sludge

Mitsuharu Terashima^{1)†}, Yoko Kotegawa²⁾, Sun Meng³⁾, Liu Bing^{1,4)} and Hidenari Yasui¹⁾

¹⁾ Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

²⁾ Nihon Suido Consultants Co., Ltd

³⁾ Graduate School of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

⁴⁾ School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University

† Correspondence should be addressed to Mitsuharu Terashima :
(Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu
E-mail : m-terashima@kitakyu-u.ac.jp)

Abstract

The rheology of anaerobically digested sludge has a great effect on its mixing behavior in the anaerobic digestion tank. The purpose of this study is to clarify the mathematical expression for the rheology of anaerobically digested sludges which behave as thixotropic pseudoplastic fluids. Structural decay parameters, which are defined as variable for pseudoplastic rheological parameters, pseudoplastic viscosity and structural index are introduced to express the rheological change with time under shear condition. The decreasing rate expression was assumed to be second-order kinetic equation with the rate coefficient described by a power function of the shear rate. The model successfully fitted the measured results of time-dependent change of pseudoplastic rheological parameters of anaerobically digested sludge under shearing.

Key words : non-Newtonian, Ostwald model, power-law fluid, time dependent, simulation