

18 超高温酸発酵処理を組み込んだ濃縮余剰汚泥の嫌気性消化

京都大学 都築良太 菊池保宏 津野洋

西村文武 日高平

Anaerobic Digestion of Concentrated Excess Sludge Incorporating Hyperthermophilic Acid Fermenter

Kyoto Univ. Ryota TSUDUKI, Yasuhiro KIKUCHI, Hiroshi TSUNO

Fumitake NISHIMURA, Taira HIDAKA

1. はじめに

現在、下水処理場から排出される生汚泥および余剰汚泥の量は乾燥ベースで年間約223万トンにも及び、埋め立て処分場の逼迫などが問題となっている。一方、地域の下水処理施設をバイオマス活用施設として、カーボンニュートラルなバイオマス資源である下水汚泥の嫌気性消化を行うことによってエネルギーを有効活用することが検討されている。従来、高温（55℃）処理に加えて、処理施設で発生する廃熱を利用して有機性廃棄物を可溶化することを目的とした超高温処理の研究が行われている¹⁾が、主に前処理段階に用いることを想定したものが多く、酸発酵処理における超高温処理の研究例は少ない。酸発酵槽において超高温処理を行うことによって、物理化学的および生物化学的な可溶化作用の相乗効果を期待することができ、エネルギー回収効率や難分解性物質の分解、病原性微生物の死滅などの観点からも、処理効果の向上を期待することができる。本研究の目的は、超高温発酵槽を組み込んだ二段発酵プロセスにおいて、タンパク質を多く含む生汚泥よりも分解しにくい余剰汚泥を処理対象としてその処理特性を検証することとし、実験室規模の反応器を用いて、一段目の酸発酵槽に超高温（80℃）処理を組み込んだ二段式嫌気性発酵プロセスにおける連続運転実験を行った。また酸発酵処理が後段のメタン発酵に及ぼす影響をより詳細に把握するため、回分式実験も行った。

2. 実験方法

2.1 連続式実験

本研究では図1に示すような二系列の二段式嫌気性消化システムにおいて連続運転実験を行った。一方は前段の酸発酵槽、後段のメタン発酵槽ともに高温条件（55℃）で、他方は前段を超高温条件（80℃）、後段を高温条件（55℃）で連続運転を行い、区別のために前者をA55-M55、後者をA80-M80と称することとした。いずれの系列もそれぞれ有効容積が1Lおよび4Lの酸発酵およびメタン発酵リアクターを用い、内部の混合液は攪拌速度200rpmに設定した攪拌機で連続攪拌

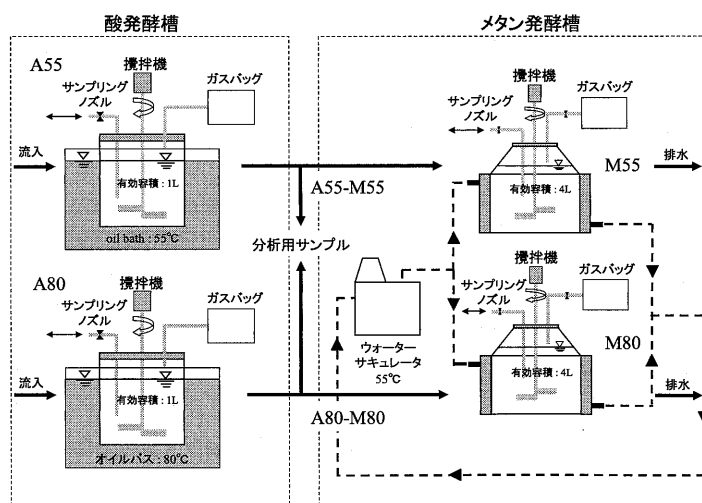


図1 連続式実験に用いたリアクターの概要

した。アルカリ添加などによる pH 調整は行わなかった。対象基質としては、標準活性汚泥法を行っている下水処理場の凝集剤添加加圧浮上濃縮余剰汚泥を用いた。サンプリングおよび基質投入はそれぞれ 1 日に一度プラスチック製シリンジを用いて手動で行った。サンプリング時はメタン発酵槽から 500mL の発酵液を採取後、酸発酵槽から 550mL の混合液を抜き取って 500mL をメタン発酵槽に投入し、残った 50mL を分析に供した。続いて基質の余剰汚泥を 550mL 計りとり、各酸発酵槽に注入した。採取したサンプルは 2℃ の冷蔵庫で保管し、その一部は 10 倍に希釈し、遠心分離後ガラス繊維ろ紙 (GF/B, Whatman) を用いてろ液を採取後速やかに -20℃ の冷凍室にて保管した。水理学的滞留時間 (HRT) は酸発酵槽で 1.8 日、メタン発酵槽で 8 日に設定し、各系列に対する有機物負荷 (OLR) は系列全体で平均 2.4gVS/L/day であった。運転期間中には測定項目としてサンプル中の COD_{Cr}、タンパク質、遊離アンモニア、TS、VS、pH および発生ガスの組成を Standard Methods²⁾に準じて 3 日に一度測定した。なお、現在運転開始から約 500 日が経過しているが、本論文では処理が安定している運転 300~500 日目について記述することとした。

2.2 回分式実験

本研究では、余剰汚泥と酸発酵汚泥の混合比が基質の COD 成分、タンパク質の可溶化および酢酸生成に与える影響を把握するために酸発酵回分式実験を、またそれぞれの混合比で 1 日消化を行った酸発酵汚泥が後段のメタン発酵に及ぼす影響を検討するために、メタン発酵回分式実験を行った。酸発酵回分式実験においては表 1 に示すような条件で超高温酸発酵処理を行った。酸発酵回分式実験には、有効容積 1L のリアクターを用い、連続式実験で培養している超高温酸発酵槽汚泥を種汚泥としてそれぞれの混合比で余剰汚泥を植種した。実験開始後、10 分、3、6、9、12、18、24、48、72 時間後にそれぞれサンプリングを行い、発酵液中の COD_{Cr}、タンパク質および揮発性脂肪酸 (VFA) 濃度を測定した。

表 1 酸発酵回分式実験の設定条件

Run	温度 (℃)	酸発酵汚泥 : 余剰汚泥 (全体積 = 1000mL)	HRT (day) (一日一度の基質投入として)	OLR (gVS/L/day)	処理時間 (h)
S0	80	余剰汚泥のみ	1	28.9	72
S25		250 : 750	1.3	21.2	
S45		450 : 550	1.8	11.7	
S75		750 : 250	4	7.5	

メタン発酵回分式実験には、有効容積 100mL のガラス製バイアル瓶を用いた。本実験においては、酸発酵汚泥として表 1 に示した各混合比で 24 時間酸発酵処理を行った混合液を用い、連続式実験におけるメタン発酵槽から採取した残渣をメタン発酵種汚泥として、連続式実験のメタン発酵槽における混合比と同じになるようにそれぞれ 7.1mL:50mL の割合で混合した。分注後、プチルゴム栓およびアルミキャップを用いてバイアル瓶を密封し、気相部を窒素ガスで置換して嫌気状態を保った。バイアル瓶は振とう台付きのウォーターバスに固定し、55℃ に保温しながら連続攪拌した。発生したガスは実験開始から 3、6 時間、1、2、3、4、5、6、7 日後にガラス製シリンジを用いて体積を測定した後、ガスクロマトグラフ (GC - 14B, Shimadzu) によりガス組成を分析した。実験終了後、発酵残渣中の COD_{Cr} 濃度を測定し物質収支を確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 連続式実験

連続式実験の結果を図 2~図 5 に示す。図 2 に示すように、A55-M55 および A80-M80 のいずれの系列においてもメタン発酵槽内汚泥の COD_{Cr} 濃度はほぼ一定に保たれており、安定した処理が行われた。COD メタン転

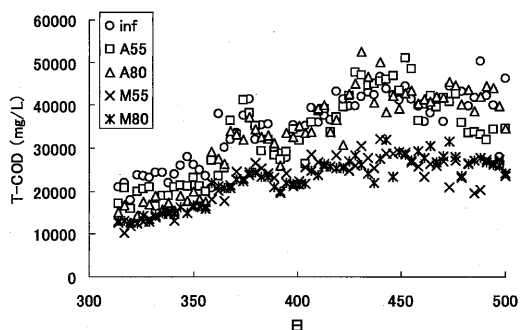
図2 各リアクター内汚泥中のT-COD_{Cr}濃度

図3 各系列におけるCODメタン転換率

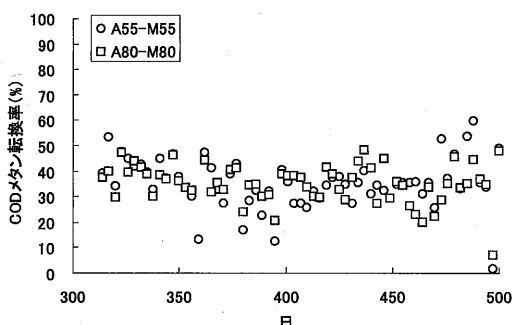


図4 各酸発酵槽におけるタンパク質可溶化率

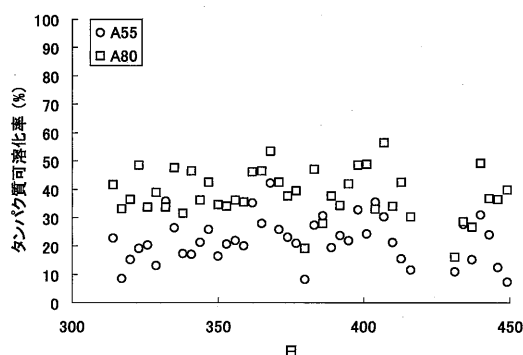
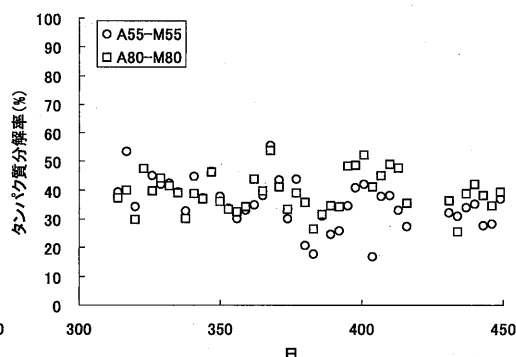


図5 各系列におけるタンパク質分解率



換率を比較すると、図3に示すようにA55-M55において平均33.9%であったのに対し、A80-M80では平均35.8%と僅かながら超高温酸発酵処理を組み込んだ系列のほうが有利な結果となった。タンパク質可溶化率については図4に示すようにA55において平均21.5%であったのに対し、A80では平均37.6%と明らかに超高温酸発酵が有利という結果が得られた。なお可溶化率は、流入基質中の固形成分が酸発酵処理により減少した量を、流入基質中の初期固形成分濃度で除して算出した。しかしながら、図5に示すように、タンパク質分解率はいずれのシステムにおいても約40%程度にとどまっており、発酵残渣中のCOD成分には未分解のタンパク質が多く含まれるのではないかと考えられる。

3.2 回分式実験

酸発酵回分式実験の結果を図6、図7に、メタン発酵回分式実験の結果を図8に示す。図6に示すように、酢酸に注目するとRUN S0において生成量が僅かであるのに対して、種汚泥を植種した系、特にRUN S45およびRUN S75においては高濃度の酢酸生成 (1700~2000mg/L) が確認された。この結果より混合液中の酢酸濃度は酸発酵汚泥を混合することで高濃度となることがわかった (なおこれ以降に示す結果は、植種した種汚泥 (酸発酵槽汚泥およびメタン発酵槽汚泥) そのものの分解による物質の生成量および減少量をブランクとして差し引いたものである)。したがって、単に熱処理のみではなく種汚泥を加えて発酵させることでメタン菌の良好な基質である酢酸が多く生成され、後段のメタン発酵に良い影響を及ぼすと考えられる。図7に各RUNにおける基質中のタンパク質可溶化率の時間変化を示す。タンパク質の可溶化は実験開始後10時間程度で上限に達し、その後緩やかに上昇した。この結果よりRUN S0を例外とすれば、種汚泥の混合割合が多いほど可溶化率も高くなることが示された。メタン発酵回分式実験における各系列における各時間における累積メタン生成量を図8に示す。なお、本回分式実験は表1に示した混合比で超高温酸発酵処理を施したものをういて

行ったため、各RUNをM0、M25、M45、M75と称することとした。最終的なメタンガス生成量は各RUNの間で大きな差はなかったものの、実験開始3～24時間後におけるメタンガス生成速度に注目すると、酸発酵処理を行ったRUN M25、RUN M45、RUN M75の方が、熱処理のみのRUN M0に比べて速度が大きいという結果となった。したがって超高温酸発酵処理はメタン発酵の早い段階でよい影響を及ぼすと考えられる。

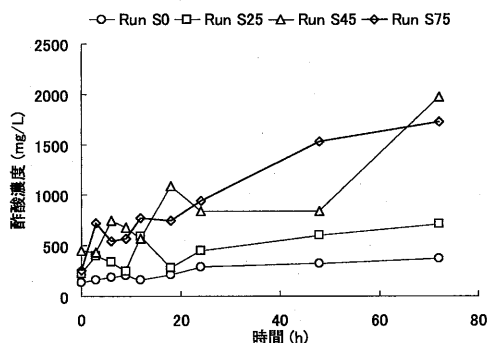


図6 酢酸生成量

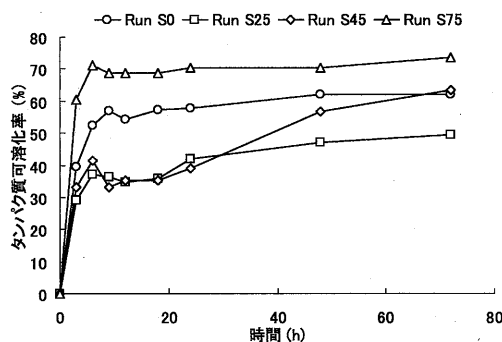


図7 タンパク質可溶化率

4. 結論

本研究では、前段に超高温酸発酵処理を組み込んだ二段式嫌気性消化の処理特性の把握を目的として連続式および回分式実験を行い、以下のような知見が得られた。

- 1) 連続運転実験の結果から、超高温酸発酵処理を組み込んだ余剰汚泥の二段式嫌気性消化によるCODメタン転換率はおよそ30～40%で安定した処理を行うことができた。
- 2) 超高温酸発酵処理を行うことによるタンパク質の可溶化効果は、高温酸発酵処理に比べておよそ15%程度高かったが、いずれの系列も未分解のタンパク質がメタン発酵残渣中に残された。
- 3) 酸発酵回分式実験の結果から、酢酸生成量は余剰汚泥に種汚泥を加えることで増加し、余剰汚泥の可溶化は実験開始後およそ10時間で上限に達することが分かった。
- 4) メタン発酵回分実験の結果から、超高温酸発酵処理を前段に組み込むことで、後段のメタン発酵において特に初期のメタン生成を促進することが示された。

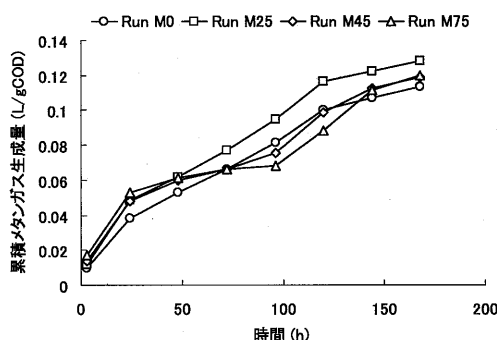


図8 累積メタンガス生成量

謝辞 本研究にご協力頂いた下水処理場関係各位、および助成頂きました(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 坪田 潤, 津野 洋 (2007). 下水道協会誌, 44(534), 122-130.
- 2) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005). 21th Ed. American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environment Federation, Washington DC, USA

キーワード: 嫌気性消化、超高温消化、余剰汚泥、メタン

Key Words : Anaerobic Digestion, Hyperthermophilic Digestion, Excess Sludge, Methane