

中低温域でのメタン発酵による炭水化物および蛋白質含有排水の処理

松本明人¹, 植木孝仁¹¹信州大学工学部

Methane fermentation of protein-containing and carbohydrate-containing wastewater under moderate to low temperature conditions

A. Matsumoto¹ & T. Ueki¹¹Faculty of Engineering, Shinshu University

キーワード: メタン発酵, 蛋白質, 炭水化物, 中低温域

Keywords: Methane fermentation, Protein, Carbohydrate, Moderate to low temperature

1. 結論

近年、ディスポーザーの導入をめぐる、我が国の下水道関係者の間で活発な議論がなされている。ディスポーザーとはモーターで回転する円板に固定された金属塊と粉碎室周辺に配置された固定歯で生ごみを粒径数 mm 程度に粉碎し、水道水とともに排水管に流すシステムであり、アメリカでは現在、約 7 割の家庭に普及している住宅設備機器である。ディスポーザーを使用した場合、ディスポーザーにより粉碎された生ごみは下水道へ投入されるが、我が国の下水道ではディスポーザー排水の直接放流を前提にしていなかったため、下水道施設や環境への悪影響が指摘され、多くの自治体でその使用が自粛・禁止されてきた¹⁾。しかしマンションのような高密度の居住形態においては生活者のニーズも高く、我が国においても 1998 年度からディスポーザー排水を専用の排水処理槽で浄化してから下水道等に放流するディスポーザー排水処理システムとして性能審査・建設大臣認定が開始されている。そして近年では首都圏の新築マンションの 7 割にシステムとして採用されているという報告²⁾もある。今後、高齢化の進行とともに、ディスポーザーがますます普及することが見込まれている。

ところでディスポーザー排水を下水道等に放流するために設置される一般住宅用ディスポーザー排水処理システムについてであるが、大きく分けて機械処理と生物処理タイプがある³⁾。一般に排水の生物処理には、好気性微生物を利用する好気性処理と嫌

気性微生物を利用する嫌気性処理があるが、このうち嫌気性処理は好気性処理に比べ曝気のためのエネルギーが不要で省エネルギー性が高い、除去有機物あたりの汚泥発生量が少ない、副産物としてメタンが得られるといった利点を有している一方、処理水質が劣る、加温が必要といった欠点も有している。

ディスポーザー排水処理システムでは処理水が下水道に放流され、最終的には下水処理場で処理されるため、さほど良好な処理水質が求められないことを考慮し、本研究ではディスポーザー排水処理システムに省エネルギー性が高く、余剰汚泥の発生が少ない嫌気性処理を導入したケースを想定した。ただしディスポーザー排水処理システムではディスポーザーや台所からシステムに流入する排水の BOD 濃度が比較的低いと考えられ、メタン発酵槽の加温が困難と予想される。そこで本研究では、中温メタン発酵の至適温度である 35℃とあわせて中低温 (25 および 15℃) 域での炭水化物含有排水および蛋白質含有排水のメタン発酵特性を調べた。

2. 実験方法

本実験の基質としては、炭水化物系の基質としてスクロース (10000mg/L) に緩衝剤と栄養塩を添加したものと蛋白質系の基質としてポリペプトン (10000mg/L) に緩衝剤と栄養塩を添加したものの二種類を用いた。種汚泥には財団法人長野県下水道公社千曲川下流管理事務所における中温嫌気性消化槽より採取した消化汚泥を容積 1L のケ

モスタッド型混合反応槽（HRT 8 日，35℃）で，スクロース（10000mg/L）およびポリペプトン（10000mg/L）を主成分とし，緩衝剤および栄養塩を添加した基質で培養したものを用いた．

実験は図 1 に示すように，容積 120mL のバイアル瓶に基質 10mL および種汚泥 30mL を注入・混合し，恒温振とう槽（3.5cm×120strokes/min）に設置し，おこなった．運転温度は 35℃，25℃，15℃ の三段階である．表 1 に実験条件を示す．

表 1 実験条件

	基質	温度	運転日数
RUN1	スクロース	35℃	14 日
RUN2	スクロース	25℃	14 日
RUN3	スクロース	15℃	21 日
RUN4	ポリペプトン	35℃	14 日
RUN5	ポリペプトン	25℃	14 日
RUN6	ポリペプトン	15℃	21 日

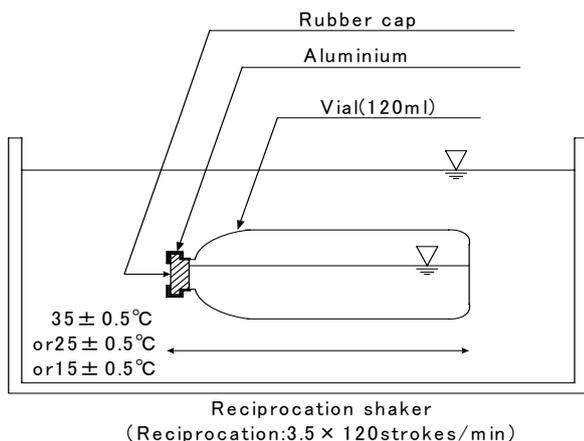


図 1 実験装置の概要

3. 分析項目

実験では，ガス生成量をガラスシリンジで毎日，計量し，同時にガス組成（TCD 式ガスクロマトグラフ法）を測定した．また運転温度 35℃ の RUN1，RUN4 および運転温度 25℃ の RUN2，RUN5 では実験開始時，実験開始後 0.5，1，2，4，7，10，14 日に，一方，運転温度 15℃ でおこなった RUN3，RUN6 では運転開始時，実験開始後 0.5，1，2，4，7，14，21 日に，バイアル瓶内容液の pH（ガラス電極法），全有機炭素（680℃ 燃焼触媒酸化/NDIR 法），揮発性脂肪酸濃度（FID 式ガスクロマトグラフ法），SS および VSS（遠心分離法：3000rpm，15 分間），アン

モニア濃度（イオンクロマトグラフ法），ATP 濃度（トリクロロ酢酸抽出法で抽出後，ルシフェラーゼ，ルシフェリンによる生物化学発光法：ATP アナライザーにて測定）を測定した．

なお本実験では全有機炭素（以下，TOC と記す）の分析試料としてバイアル瓶内容液を遠心分離（3000rpm，15 分間）にかけ，その上澄み液をさらに孔径 0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過したものを用いた．測定された TOC を本報告では FTOC と記す．FTOC は微生物等を含まない溶解性有機物の炭素濃度をあらわしている．

4. 実験結果および考察

図 2，図 3 にスクロースおよびポリペプトン基質における FTOC 除去率の経日変化を示す．スクロース基質においては運転温度 35℃ の RUN1，そして 25℃ の RUN2 とも，実験開始直後から速やかに FTOC は除去され，RUN1 では運転開始後 0.5 日で除去率は 62%，1 日で 82% に達し，その時点で FTOC 除去はほぼ終了した．なお実験終了時（14 日後）の除去率は 85% であった．RUN2 では実験開始後 0.5 日で 27%，1 日で 66%，2 日後に 85% を示し，FTOC 除去はほぼ終了した．ただし 7 日目以降，若干除去率が低下し，実験終了時（14 日後）の除去率は 80% であった．一方，運転温度 15℃ の RUN3 においては RUN1 や RUN2 に較べると FTOC 除去の立ち上がりは緩やかで実験開始後 0.5 日で 22%，2 日後に 45%，7 日後に 72% を示し，7 日目以降はさらに緩やかに除去が進行した．実験終了時（21 日後）の除去率は 83% であった．なお実験開始時における FTOC 濃度は RUN1 が 1230mg/L，RUN2 が 1130mg/L，RUN3 が 1210mg/L であった．

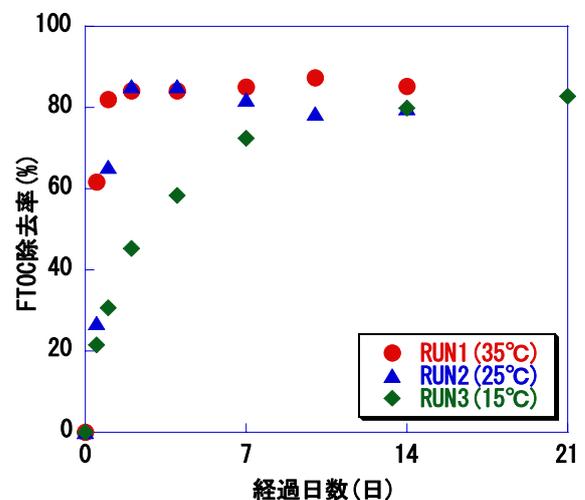


図 2 FTOC 除去率の経日変化（スクロース基質）

一方、ポリペプトン基質においても運転温度 35℃ の RUN4 および 25℃ の RUN5 では実験開始直後から FTOC は除去され、RUN4 では運転開始後 1 日で 59%、2 日後には 72%、そして 4 日後には 87% となり、ほぼ FTOC 除去は終了した。なお実験終了時 (14 日後) の除去率も 87% であった。RUN5 では実験開始後 1 日で 35%、2 日後に 63%、そして 4 日後には 82% に達した。35℃ と同様、4 日後には FTOC 除去はほぼ終了し、実験終了時 (14 日後) における除去率は 87% であった。一方、運転温度 15℃ の RUN6 ではスクロース基質の場合と同様、RUN4 や RUN5 に較べると FTOC 除去の立ち上がりは緩やかで実験開始後 1 日に 9%、4 日後には 34%、7 日後には 59%、そして 14 日後には 86% となり、FTOC の除去は終了した。なお実験終了時 (21 日後) の除去率は 85% であった。実験開始時における FTOC 濃度は RUN4 が 1220mg/L、RUN5 が 1150mg/L、RUN6 が 1190mg/L であった。

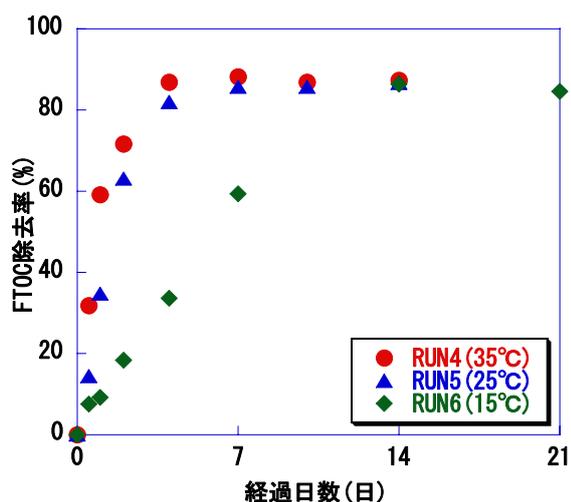


図3 FTOC 除去率の経日変化 (ポリペプトン基質)

以上、FTOC 除去についてまとめると、まずスクロース基質とポリペプトン基質では FTOC の除去がほぼ終了するまでの期間から判断してスクロース基質のほうが、若干、除去の進行がはやいことがわかる。一方、FTOC 除去率に関してはポリペプトン基質のほうがわずかに高い値が得られているものの、両基質とも 80% 以上の良好な除去率であった。つぎに FTOC 除去に及ぼす温度の影響に関して述べる。スクロース基質、ポリペプトン基質それぞれにおいて運転温度 25℃ および 35℃ における FTOC 除去がほぼ終了するまでの期間に大きな差はなく、同じ基質では FTOC 除去の進行速度に大きな違いはなかった。一方、運転温度 15℃ では終了までの期間は長くなり、除去の

進行速度が大きく低下している。ただし最終的な FTOC 除去率はスクロース基質、ポリペプトン基質とも運転温度に関わらずほぼ同じであり、運転温度による FTOC 除去の速度低下がおきても、運転期間を長くとることによりカバーできることがわかった。

続いてスクロースおよびポリペプトン基質における累積メタン生成量の経日変化を図 4、図 5 に示す。スクロース基質では運転温度 35℃ の RUN1 および運転温度 25℃ の RUN2 とも実験開始直後から順調にメタンが生成し、RUN1 では運転開始後 0.5 日に 224mL/L、1 日後で 611mL/L に達し、運転開始後 2 日には 790mL/L に達した。2 日目以降、メタン生成量の増加は緩やかになり、実験終了時 (14 日後) に 1160mL/L となった。RUN2 では実験開始後 0.5 日で 102mL/L、1 日後では 382mL/L、2 日後には 682mL/L に達した。そしてそれ以降、メタン生成量の増加は緩やかになり、実験終了時 (14 日後) には 947mL/L となった。一方、運転温度 15℃ の RUN3 では RUN1 や RUN2 に較べるとメタン生成の立ち上がりは緩やかで運転開始後 0.5 日に 9mL/L、1 日後では 28mL/L であったが、その後徐々にメタン生成量は増大し、2 日後に 94mL/L、4 日後には 280mL/L、運転開始後 7 日で 533mL/L となった。そして 7 日目以降、メタン生成量の増加は鈍化し、実験終了時 (21 日後) には 759mL/L であった。

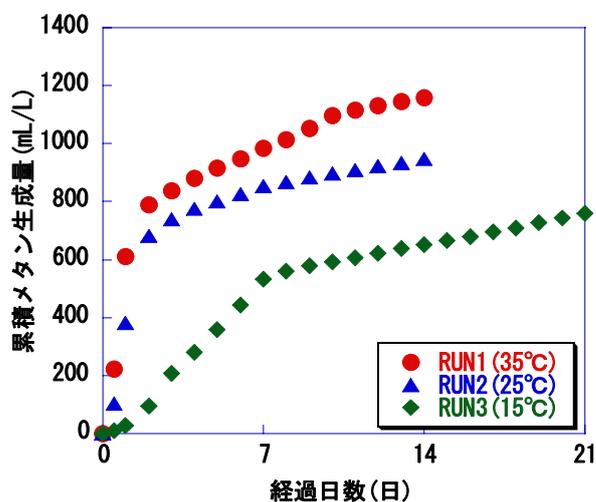


図4 累積メタン生成量の経日変化 (スクロース基質)

ポリペプトン基質においても運転温度 35℃ の RUN4 および 25℃ の RUN5 ともに実験開始直後から順調にメタンが生成し、RUN4 では運転開始後 0.5 日に 209mL/L、1 日後で 509mL/L、3 日後には 974mL/L に達した。その後メタン生成量の増加は緩やかになり、

実験終了時（14日後）に1168mL/Lとなった。RUN5では運転開始後1日で297mL/L、2日後で656mL/L、実験開始後4日に965mL/Lに達した。その後、メタン生成量の増加は緩やかになり、実験終了時（14日後）には1189mL/Lであった。一方、運転温度15°CのRUN3ではRUN1やRUN2に較べるとメタン生成の立ち上がりは緩やかで運転開始後0.5日に10mL/L、1日後で35mL/Lであったが、その後徐々にメタン生成量は増大し、運転開始後2日で99mL/L、4日後に287mL/L、運転開始後11日で913mL/Lとなった。そして11日目以降、メタン生成量の増加は鈍化し、運転開始後14日で988mL/L、実験終了時（21日後）に1050mL/Lとなった。

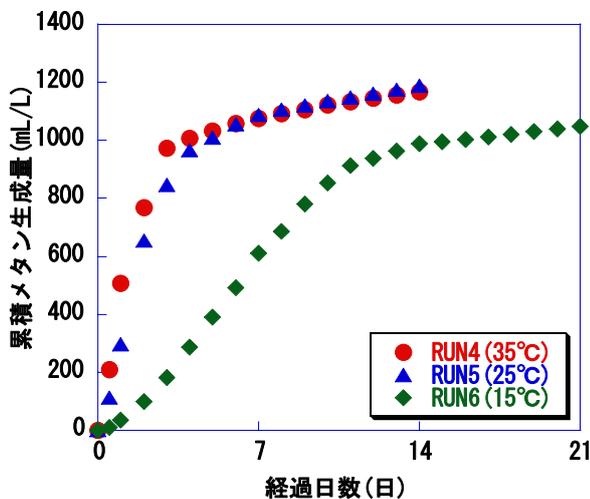


図5 累積メタン生成量の経日変化（ポリペプトン基質）

以上、メタン生成についてまとめると、まずスクロース基質とポリペプトン基質ではメタン生成量の増加が大きく鈍るまでの期間を較べるとスクロース基質のほうがポリペプトン基質の場合に較べ、若干、短期間にメタン生成量増加の鈍化がおきている。これはFTOC除去の進行がスクロース基質のほうがはやかったことに関連していると考えられる。つぎに、累積メタン生成量に関してであるが、特にスクロース基質の場合、基質除去にともなうメタン生成反応が終了する以前に、実験を終了した可能性もあり、実験終了時の累積メタン生成量が基質除去に伴う最終的な累積メタン生成量に等しいと判断することが難しい。そこでメタン生成量の増加が大きく鈍りはじめた時点（以下、傾きが変わる点とする）での累積メタン生成量で考察をおこなう。スクロース基質の場合は、傾きが変わる点までの累積メタン生成量

がいずれの運転温度においてもポリペプトンに較べ低めの値となっている。ただしスクロース基質の場合は傾きが変わる点以降も比較的活発にメタン生成がおきているため、例えばバクテリアにより除去された有機物成分が直ちにメタンへ変換されず、かなりの部分が一度菌体成分に変換後、メタンに変換されるといった代謝経路をとっている可能性がある。なお揮発性脂肪酸の蓄積はスクロース基質を用いた運転温度15°CのRUN3において実験終了時点で多少生じていたが、RUN1およびRUN2では2日目以降には観察されず、スクロース基質における累積メタン生成量の低さに対する揮発性脂肪酸蓄積の影響はないと考えられる。つぎにメタン生成に及ぼす温度の影響についてであるが、累積メタン生成量の傾きが変わる点に達するまでの期間から判断してスクロース基質、ポリペプトン基質とも運転温度25°Cおよび35°Cにおけるメタン生成の進行速度に同一基質間では大きな差は見られなかったが、運転温度15°Cでは進行速度は大きく低下した。一方、傾きが変わる点における累積メタン生成量はスクロース基質において温度の影響を受け、35°Cにおける累積量が多量も多く、ついで25°C、そして15°Cの順であった。それに対し、ポリペプトン基質においては累積メタン生成量の温度による大きな差は見られなかった。菌体収率が温度によって変化する⁴⁾という報告もあり、スクロース基質の場合、除去された基質のうち、菌体成分に変換される割合（菌体収率）が温度により変化し、累積メタン生成量に差が出た可能性も考えられる。

5. 結論

ディスポーザー排水処理システムに嫌気性処理を導入したことを想定し、炭水化物含有排水としてスクロース、そして蛋白質含有排水としてポリペプトンを主成分とする基質を用い、運転温度を35°C、25°C、15°Cと変化させ、温度変化がそれぞれのメタン発酵特性に及ぼす影響について調べた。

その結果、FTOCの除去に関してはスクロース基質、ポリペプトン基質それぞれにおいて運転温度25°Cおよび35°CにおけるFTOC除去の進行速度に大きな差は見られなかったが、運転温度15°Cでは進行速度は大きく低下した。ただし最終的なFTOC除去率はスクロース基質、ポリペプトン基質とも運転温度に関わらず同じであり、運転温度による処理速度低下は、運転期間によりカバーできることがわかった。

メタン生成に関してはスクロース基質，ポリペプトン基質とも運転温度 25℃および 35℃におけるメタン生成の進行速度に同一基質間で大きな差は見られなかったが，運転温度 15℃では進行速度は大きく低下した．一方，累積メタン生成量はスクロース基質において温度の影響を大きく受け，35℃における累積量をもっとも多く，ついで 25℃，そして 15℃の順であった．ポリペプトン基質においては温度による累積メタン生成量の大きな差はみられなかった．

【参考文献】

1) 稲森悠平，徐開欽，蛭江美孝，稲森隆平，村松正利：デ

ィスポーザの循環型社会形成に資する管理型適正普及方策と高度化の課題と展望，用水と廃水，Vol.48, 586-596, 2006.

2) 豊貞佳奈子，清水康利：ディスポーザ排水処理システムの適正普及のあり方，用水と廃水，Vol.48, 606-610, 2006.

3) 山崎宏史，栗原亮一，鈴木理恵：ディスポーザ排水処理システム適合評価の現状と適正普及へ向けた今後の課題，用水と廃水，Vol.48, 611-616, 2006.

4) R. E. Speece: 産業廃水処理のための嫌気性バイオテクノロジー（松井三郎・高島正信監訳），p. 84，技報堂出版，東京，1999.

(原稿受付 2007.3.15)