特集2・食品産業廃棄物のメタン発酵技術

高濃度共発酵法を用いた油脂のメタン化技術

李 玉友*・山下耕司**・水野 修**・佐々木宏**・関 廣二**

キーワード：油脂，メタン発酵，共発酵，生ごみ，余剰汚泥

1. はじめに

油脂は食品工場排水・廃棄物の主要成分の一つであり，水質分析において脂肪またはヘキサン抽出物として定量されている．食油製造，缶詰や食肉加工，乳製品製造，羊毛や皮革加工などの廃水处理から油脂含有率60%以上の有機性廃棄物が発生する¹⁾．また浄化槽，下水道のポンプ場や終末処理場のスクリーンユニットで発生するスカムには油脂含有率が75～95%まで達する．これらの油脂廃棄物には動物性油脂が多く，粘性が高いため，迅速で適切な処理処分が求められている．一方，油脂廃棄物は貴重なバイオマス資源の1種類であり，そのリサイクル処理が望まれる．

従来の研究によれば，十分な攪拌と適切な負荷条件において油脂がほぼ完全にメタンと炭酸ガスに分解されることは知られている^{2,6)}．油脂メタン発酵は(1)式の化学量論式が示す通り，1gの油脂から1.425Lのバイオガスを生成でき，しかもバイオガス中のメタン含有率が69.5%と高い⁷⁾．

即ち，油脂のメタン発生ポテンシャルが比較的高い．また油脂のメタン発酵において細菌の増殖収率が0.038g-VSS/g-CODと低く¹²⁾，好気性活性汚泥法の1/10程度なので，余剰汚泥の生成量が少ない．従って，油脂のメタン化処理により，汚泥発生量の低減とバイオガスエネルギー資源の回収という一石二鳥の効果が期待できる．一方，従来のメタン発酵技術では，油脂分散乳化の問題及び高級脂肪酸によ

る阻害問題が技術的壁であり⁸⁻¹¹⁾，油脂のメタン化技術は確立されていない．

著者らはよく分散されている状態において油脂が嫌気性微生物によりメタンまで分解できることに着目して，高濃度混合メタン発酵処理に関する技術開発を進めた結果，高濃度共発酵条件において油脂をバイオガスに変換できるシステムの開発に成功した^{7,13)}．ここに同システムの概要を紹介するとともに，応用実験例を用いてその処理成績を報告する．

2. 高濃度共発酵法による油脂メタン化の理論とプロセス

2.1 油脂メタン発酵処理の問題点と対策

2.1.1 油脂疎水性と乳化・分散問題

油脂は疎水性物質であり，水系において浮上性の油脂固まりを形成する傾向が強い．この油脂固まりは比表面積が小さいので，微生物に分解されにくい．従って，油脂の分解効率を上げるには，油脂を乳化させ，微生物に利用されやすい形態に分散させることが重要である．また動物性油脂の融点が高いため，常温，中温では解けにくいと考えられる．従って油脂の可溶化を促進するために，分散処理の他に加温処理も効果的であると考えられる．

2.1.2 高級脂肪酸の阻害およびその防止方法

油脂の分解に伴って生成する中間代謝産物である高級脂肪酸は阻害性があるため，その濃度が1g/L以上に蓄積すると，メタン発酵に深刻な阻害を及ぼす．特に高級脂肪酸がVFAと共存すると，その阻害効果がいっそう強まると報告されている．高級脂肪酸の蓄積を防ぐために，高級脂肪酸とVFAの分

Biomethanization of fats using a high-solids co-digestion process

*東北大学大学院 Yu-Yon LI

**アタカ工業(株)環境研究所 Kouji YAMASHITA, Osamu MIZUNO, Kouji SEKI

解速度を高めると同時に、高級脂肪酸の生成速度を制限する必要もある。前者の対策としてはメタン生成微生物の濃度を上げることと、微生物と高級脂肪酸の接触を促進するための十分な攪拌を行うことが挙げられる。また後者の対策としては油脂の投入負荷を制限する必要がある。

2.1.3 油脂メタン化処理の促進方法

油脂メタン発酵の効率化を追求するために、高負荷条件での高速処理が望ましい。それを実現するために、油脂分散方法の工夫を始め、発酵温度、適正負荷の検討が必要である。

2.2 高濃度共発酵プロセスの基本フローと特徴

前述したように油脂を嫌気性条件で生物分解するには、まず油脂を微生物が利用できる分散状態に調質しなければならない。また油脂の嫌気的分解においては、油脂分解菌とメタン生成菌の連携・

共生が必要不可欠である。廃棄物を分解するのに化学分散剤または酵素を使うとコストが高くなるので、本研究では濃縮汚泥や生ゴミなどの有機性固形廃棄物を油脂分散剤として利用し、共発酵（Co-digestion）で両方をメタンまで分解する技術を工夫した。この共発酵の原理を図-1にまとめた。添加した汚泥や生ごみは油脂の分散効果の他に、栄養効果、分解促進効果も考えられる。

この原理に基づき、本研究で提案した技術は、図-2のようにまず油脂を加温して液化化させ、そして濃縮汚泥や生ゴミなどの有機性固形廃棄物を添加して生物分解しやすい均一な油脂スラリーを作る調質工程（油脂分散）と、調質した油脂スラリーを高濃度の嫌気性微生物でメタンまで分解するメタン発酵工程との2段システムで構成されている。前段調質工程で添加した汚泥または生ゴミで油脂を均一

図-1 油脂のメタン発酵過程および共発酵の効果

図-2 高濃度共発酵による油脂のバイオガス化（メタン化）処理システム

分散させて、メタン発酵しやすい性状に調質する。また後段のメタン発酵では、油脂分解菌とメタン生成菌を高濃度に維持するとともに、投入物と菌体が速やかに混合されるようにガス攪拌と機械攪拌を併用してメタン発酵槽内を十分に攪拌することで、油脂を効率よく分解できる。

本システムの特長は以下の通りである。

- (1) 濃度（投入TS10～25%）・高負荷条件（TS容積負荷6.7-15 kg/m³/d）で油脂を効率よく分解することが可能である。分解率は80%以上。
- (2) 特殊な酵素や微生物の投入が不要で、一般の消化汚泥を種汚泥として用いるので、処理コストがやすい。
- (3) 余剰活性汚泥や生ゴミなどの有機性廃棄物を油脂の分散剤・栄養剤として利用し、Co-digestionを行うので安定運転を確保でき、生成したバイオガスは有効利用できる。

3. 生ごみを油脂分散剤とした共発酵プロセスによる油脂のメタン化処理実験

3.1 実験目的

油脂廃棄物を発生する食品工場において、生ゴミなどの食品廃棄物を同時に発生するケースがある。この場合、破碎生ごみを油脂の分散剤として利用することが考えられる。本実験はこのようなケースを想定して図-2に示す共発酵プロセスによる油脂のメタン化効果を確認するものである。

3.2 実験材料および方法

研究に用いた実験装置は図-3（次頁）に示したような2段階共発酵連続装置である。第1段階では、油脂汚泥の分散・均質化を図るために、分散剤として微破碎された生ごみ（径3mm以下の微粒子）

を添加して分散調質槽で均質のスラリーを調整する。ここで動物性油脂の凝固を防ぐために、温度を40℃以上に保温し、またスラリーの流動性を保証するために、水道水を添加してTS濃度を14±2%程度に調整した。油脂汚泥はレストラン街の排水より回収した油脂スカム（脂肪含有率は95%以上）を用いた。また、生ごみ¹⁴⁾は果物類（30%）、野菜類（36%）、肉・魚・卵（14%）および残飯類（20%）を混合して高速ブレンダーで粒径3mm以下に微破碎したものであった。調整したスラリーに含まれる油脂含有率はTSベースで約55%であった。この第1段階の主な役割は濃度調整、油脂の分散による均質化スラリーの作成、酸発酵による低分子化などがあげられる。

第1段階で調質された均質スラリーをローラーポンプでメタン発酵槽に投入した。メタン発酵槽全容量は8Lで液体反応有効容積は5Lである。攪拌はガス循環ポンプによるガス返送で行っている。投入ポンプはタイマーコントローラで制御されているので、メタン発酵槽への基質投入は1日4回、1回の投入量は反応槽容量の1/60程度の半連続的自動運転が実現できた。メタン発酵槽で発生したガスは容量式ガスメーターで計量した。また処理混合液はタイマー制御装置付きローラーポンプで定量的に排出されていた。

メタン発酵槽は温水ジャケットで保温し、中温発酵は36℃に、高温発酵は55℃にそれぞれ維持して、2系列で同時に実験を行った。種汚泥は油脂メタン実験で培養した消化汚泥を用い、本実験条件に変更した後、約3ヶ月間（滞留時間15日の約6倍）連続運転した。

分析方法はこれまでの研究報告と同じである^{7, 14)}。

図-3 二段共発酵方式メタン発酵の連続実験装置の概要図

3.3 実験結果および考察

3.3.1 油脂汚泥の分解条件と調質槽の役割

油脂汚泥を普通に攪拌すると、その分散が極めて難しい。本技術では、生ごみや汚泥と高濃度で混合し、しかも40℃以上の加温条件で攪拌したため、動物性油脂の粘着性が改善されただけでなく、油脂の分散も比較的良好にできた。表1には調質した高濃度油脂スラリーの平均的分析結果を示す。油脂汚泥と生ごみを混合して油脂含有率が55%ぐらいであったが、高濃度嫌気性消化を行うことで、良い処理成績が得られた。

3.3.2 メタン発酵槽の運転経過

高濃度共発酵による油脂汚泥のメタン発酵特性を確認するために、中温メタン発酵と高温メタン発酵

の2条件で、実油脂汚泥と生ごみの混合メタンの連続実験を行った。図-4に一例として、高温メタン発酵における代表的運転指標の経時変化を示す。脂肪含有率55%、投入TS濃度14%の高濃度条件で投入して約3ヶ月実験を続けた結果、VS除去率が80%以上、ガス発生速度6～8 L/L・日程度で安定していた。また、反応槽内の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度が2000 mg/L以下であって、アンモニア阻害の心配もなかった。

3.3.3 分解処理による減量化率とガス生成

表2にメタン発酵槽No.1（中温発酵）とメタン発酵槽No.2（高温発酵）の操作条件、有機物分解およびガス生成に関する実験結果の平均値をまとめている。投入TS濃度140 g/L（14%）で中温嫌気性消化を行うと、反応槽内のTS濃度は約48 g/L（4.8%）で、TSの減量化率は65%程度で COD_{cr} 分解率は74%程度であった。それに対して高温消化を行うことで、残存TS濃度は約22 g/L（2.2%）で全体の減量化率は84%、 COD_{cr} 分解率も82%程度と高かった。ガス生成倍率（1 m³の投入汚泥から得られる消化ガスの容量m³）は100ぐらいで、下水汚泥高濃度消化（投入TS4～5%の条件での20倍という値に比較して）の約5倍ほどであった。メタンガスの含有率は68～71%と比較的に高かった。

表1 調質した油脂スラリーの性状

項目	単位	濃度
PH	—	4.6
VFA (C2)	mg/L	15700
TS	g/L	140
VS	g/L	130
T-COD	g/L	252
T-COD/TS	—	1.8
T-脂肪	g/L	77.1
T-脂肪/TS	%	55
T-N	mg/L	2340
T-P	mg/L	286

図－４ 生ごみを油脂分散剤とした高温共発酵実験におけるメタン発酵槽の運転状況
槽内TS濃度，VS除去率，NH₄⁺－N濃度及びバイオガス発生速度

表 2 高濃度共発酵による油脂汚泥の分解実験の平均値

項目		単位	メタン発酵槽No.1		メタン発酵槽No.2	
環境条件	温度	℃	中温		高温	
	滞留時間	日	15		15	
	TS負荷	kg/m ³ ・d	9.3		9.3	
	CODcr 負荷	kg/m ³ ・d	16.8		16.8	
環境条件	pH	—	7.46		7.64	
	アルカリ度	mg/L	6020		7290	
	NH ₄ ⁺ －N	mg/L	1180		1820	
有機物分解			平均濃度	分解率%	平均濃度	分解率%
	TS	g/L	47.9	65.8	22.3	84.1
	VS	g/L	40.2	69.1	17.8	86.5
	SS	g/L	26.6	—	6.9	69.6
	VSS	g/L	22.9	8.4	6.1	71.9
	脂肪	g/L	21.3	72.4	3.7	92.4
	T-CODcr	g/L	65.1	74.2	43.6	82.6
	S-CODGr	g/L	24.8	—	25.5	—
ガス生成	発生倍率	m ³ /m ³ 投入物	94.9		103	
	ガス生成量	m ³ /kg－投入T	0.676		0.728	
ガス組成	CH ₄	%	68.3		70.2	
	CO ₂	%	31.7		29.8	

3.3.4 中温発酵と高温発酵による脂肪分解の比較

本研究において高温条件での有機物分解率（VSやCOD_{cr}）が中温より10%以上高かった。とくに

脂肪の分解率について比較すると中温では72%であったのに対して，高温消化では90%以上の高い脂肪分解率が得られた。このように実油脂汚泥の分

解においても高濃度・高温消化の優位性が明らかであった。

3.3.5 高濃度Co-digestionによる油脂分解の効果

従来、油脂の生物分解が困難と言われてきた。その原因は油脂が疎水性であり、スカム形成と汚泥浮上による物理的要因と、脂肪分解で生成する高級脂肪酸による阻害であると考えられる。しかし、脂肪そのものは分解できないわけではない。本研究では、2段Co-digestionシステムを構築することで、油脂分解の難点を克服し、高負荷処理と高い分解率を実現できた。これを可能にしたのは次の2点の技術的工夫によるものと考えられる。

- a. 破碎生ごみの粒子状物質との共発酵により、油脂の分散がよくでき、メタン発酵しやすい均質な高濃度スラリーを調質できた。
- b. 高濃度メタン発酵方式を採用したことでメタン発酵槽内に嫌気性細菌を高濃度に保持できたので、脂肪に対する分解能力が高く、投入されたものは速やかに分解されている。よって阻害性のある高級脂肪酸の蓄積を防ぐことができた。

4. ま と め

油脂含有率の高い食品廃棄物を効率よく分解するために、油脂を均一に分散する混合槽と高温高濃度嫌気性消化を行う高速メタン発酵槽からなる二段共発酵システムを構築した。同システムの有効性を確認するために油脂汚泥と生ごみをTSベース1:1で混合して（油脂含有率が55%ぐらい）高濃度嫌気性消化の連続実験を行った結果、次の通り、良い処理成績が得られた。

投入TS濃度140 g/L（14%）で高温消化を行うことで、残存TS濃度は約22 g/L（2.2%）で全体の減量化率は84%、COD_{cr}分解率も82%程度と高かった。ガス生成倍率（1 m³の投入汚泥から得られる消化ガスの容量m³）は100ぐらいで下水汚泥高濃度消化（投入TS4~5%の条件での20倍という値に比較して）の約5倍ほどであった。メタンガスの含有率は68~71%と比較的高かった。

中温嫌気性消化を行うと、反応槽内のTS濃度は約48 g/L（4.8%）で、全体の減量化率は65%程度でCOD_{cr}分解率は74%程度であった。それに対して高温条件での分解率が10%以上高くなっていた。とくに脂肪の分解率について比較すると、中温では72%であったのに対して、高温消化では90%以上

の高い脂肪分解率が得られた。このように油脂の分解において高濃度・高温消化の優位性が明らかであった。

このように本システムを用いることで、従来生物処理が困難であると言われてきた高濃度の油脂を効率よく分解し、バイオガスとして回収利用することができた。

参 考 文 献

- 1) Mackie, R.I., White, B.A., Bryant, M.P. : Lipid metabolism in anaerobic ecosystems. *Crit. Rev. Microbiol.*, 17, 449-497 (1991)
- 2) 花木啓祐, 松尾友矩, 長瀬道彦: 嫌気性消化における種々の基質の分解過程(Ⅱ): 余剰活性汚泥と脂質の分解に関する検討, 下水道協会誌, 17 (No.196), 40-49 (1980)
- 3) Heukelekian H. and Mueller P. : transformations of some lipids in anaerobic sludge digestion. *Sewage Ind. Wastes*, 30, 1108-1120 (1958)
- 4) Novak, J.T., Carlson, D.A. : The kinetics of anaerobic long chain fatty acid degradation. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 42, 1932-1943 (1970)
- 5) Broughton, M.J., Thiele J.H., Birch, E. J. and Cohen, A. : Anaerobic batch digestion of sheep tallow. *Wat. Res.*, 32, 1423-1428 (1998)
- 6) Jarvis, G. N., Strompl, C., Moore E.R.B. and Thiele, J.H. : Isolation and characterization of two glycerol-fermenting clostridial strains from a pilot scale anaerobic digester treating high lipid-content slaughterhouse waste. *J. Appl. Microbiol.*, 86, 412-420 (1998)
- 7) 李玉友, 佐々木宏, 山下耕司, 関廣二: 高濃度混合メタン発酵法による油脂含有食品廃棄物のメタン化処理, 用水と廃水, 45 (3), 234-242 (2003)
- 8) Angelidaki, I. and Ahring, B.K. : Effects of free long-chain fatty acids on thermophilic anaerobic digestion. *Appl. Microbiol. Biotech.*, 37, 808-812 (1992)
- 9) Rinzema, A., Boone, M., van Knippenberg, K., and Lettinga, G. : Bactericidal effect of long chain fatty acids in anaerobic digestion. *Wat. Environ. Res.*, 66, 40-49 (1994)
- 10) 小松俊哉, 花木啓祐, 松尾友矩: 嫌気性消化における不飽和高級脂肪酸阻害および分解過程, 衛生工学研究論文集, 26, pp.1-8 (1990)
- 11) 緒春鳳, 李玉友, 宮原高志, 野池達也: 中温および高温メタン発酵に及ぼす高級脂肪酸の阻害効果の比較, 土木学会論文集, N559/VII-2, pp.31-38 (1997)
- 12) Pavlostathis S. G. and Giraldo-Gomez E. : Kinetics of anaerobic treatment : A critical review, *Critical Reviews in Environmental Control*, 21 (5,6), 411-490 (1991)
- 13) Li, Y.Y., Sasaki, H., Yamashita, K., Seki, K. and Kamigochi, Y. : High-rate methane fermentation of lipid-rich food wastes by a high-solids co-digestion. *Wat. Sci. Tech.*, 45 (12), pp.143-150 (2003)
- 14) 李玉友, 佐々木宏, 奥野芳男, 関廣二, 上垣内郁夫: 生ごみ・尿汚泥の高効率メタン発酵技術に関する基礎的検討, 環境技術, 27 (12) pp.867-874 (1998)