

嫌気性消化における脂質分解 と相分離の効果

田 中 修 三*

Degradation of Lipids and Effects of Phase Separation in Anaerobic Digestion

by Shuzo TANAKA

Abstract; Effects of phase separation on the anaerobic degradation of the whole milk were investigated by both batch and continuous experiments. Carbohydrates in the milk were most extensively decomposed (95%), next proteins (50%), while lipids were rapidly hydrolyzed to long-chain fatty acids but not degraded during the acid phase. Long-chain fatty acids were adsorbed by the bacteria after being hydrolyzed and strongly inhibited the methane production in the single phase system. However, the phase separation successfully reduces the toxicity of long-chain fatty acids to both acetogenic and methanogenic bacteria because the acids are adsorbed by acidogenic bacteria, not fatally affected by them, during the acid phase.

1. はじめに

近年、嫌気性消化法において酸生成相とメタン生成相の分離すなわち相分離により、消化効率の向上を図ろうとする二相消化法が注目を集めている。消化効率の低下に対しては種々の原因が考えられており、その一つとして基質中の難分解性成分による阻害があげられる。脂質成分による阻害はその典型であり、ひいては消化プロセスの停止に至る可能性もある^{1),2)}。そこで、本研究では、嫌気性消化における脂質の分解過程を追跡し、その阻害を明らかにし、さらにその阻害に対して相分離がどのような効果を及ぼすかを調べた。

2. 実験方法

実験は回分式と連続式により消化温度 37℃ で行い、脂質の分解過程は回分実験により、相分離の効果については両実験により調べた。回分実験では、約 120 ml のバイアルびんを用い、表 1 に示した初期汚泥負荷（初期 MLVSS 当りの投与 COD）で全乳および脱脂乳を基質とした実験を行った。表 1 における酸槽混合液とは連続実験における酸槽の混合

* 理工学部土木工学科専任講師 衛生工学

表 1 回分実験における各 Run の
初期汚泥負荷

基 質	Run	初期汚泥負荷 (mgCOD/mgMLVSS)
全 乳	1	2.8
	2	5.3
	3	10.0
	4	11.2
	5	13.0
脱脂乳	6	10.0
	7	13.0
酸 槽	8	2.6
	9	4.1
混合液	10	9.8

表 2 基 質 組 成

成 分	重量比率 (%)	
	全 乳	脱脂乳
炭 水 化 物 (乳 糖)	57 (50)	52 (52)
蛋 白 質	13	35
脂 質	25	1
そ の 他	5	12

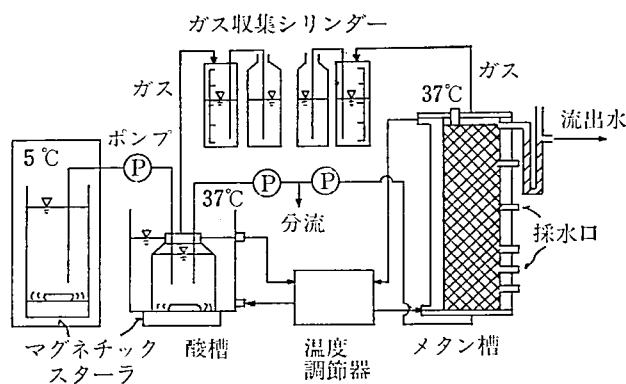


図 1 二相嫌気性消化の連続実験装置

液を基質としてバイアルびん内でメタン発酵を起こさせるもので、疑似二相消化と考えた。なお、各 Run での初期汚泥負荷は 120~150 mg/l の MLVSS に対して 1,300~1,600 mg COD/l の基質を等量投与することにより設定した。

連続実験では、図 1 に示した完全混合型の酸槽と上向流汙床を用いたメタン槽からなる装置による二相消化実験と、汙床のみを用いた単相消化実験を行った。汙床には網目格子を持つ円筒状の汙材 (D 社製 N-1" ネットリング) を充填し、汙床内空隙率は 89% とした。基質としては全乳を用い、流入水 COD 濃度は 1,500 mg COD/l とした。

本実験で用いた基質は M 社製の全乳 (育児用粉ミルク) と脱脂乳 (スキムミルク) であり、各々の組成は表 2 に示す通りである。また、C/N 比が約 7 になるように重炭酸アンモニウムおよび pH 調整のためにリン酸緩衝剤を基質と共に投与した。種汚泥としては、全乳あるいは脱脂乳で半連続培養方式により半年以上培養した汚泥を用いた。

主な分析項目と方法は表 3 に示した通りである。また、反応物と生成物の物質収支を直接とれるようなほとんどの有機成分を COD 当量で表示した。酸およびメタンの生成量を表わすのに用いた COD 転換率とは、投与 COD に対する各々の生成量の率である。

表 3 主な分析項目と方法

項 目	分 析 方 法
ガ ス 成 分	ガスクロマトグラフ (TCD)
有機酸・アルコール	ガスクロマトグラフ (FID)
炭 水 化 物	フェノール硫酸法
蛋 白 質	TCA で沈殿後 Lowry らの方法
脂 肪	Bligh & Dyer 法により抽出後酸化法
COD	重クロム酸カリウム法

3. 実験結果と考察

3.1 回分実験

3.1.1 全乳および脱脂乳における基質分解

酸およびメタンの代表的な生成過程を、全乳については成分別分解を含めて図2に、脱脂乳については図3に示した。全乳において、Run 1のような低負荷の場合は酸およびメタンともに急速に生成されているのに対し、Run 4のような高負荷になると、酸生成における COD 転換率 40% 付近での一時的な停滞とメタン生成の長期の遅滞がみられた。各 Run での成分別分解をみると、炭水化物（ほとんどが乳糖）は汚泥負荷に関係なく最初の1日でそのほとんどが分解されているのに対し、脂質の分解は高負荷になるにつれて遅れる傾向を示した。脂質の測定は検水を遠心分離した後の上澄みと汚泥部分に分けて行ったが、最初の1日目でも上澄み中にはごくわずかしが存在せず、そのほとんどが汚泥部分から検出された。一方、脱脂乳においては、Run 4と同程度の負荷である Run 6 (図3) においても酸やメタンの生成に目立った遅滞はみられなかった。このことより、ミルク中の炭水化物や蛋白質は高負荷になっても酸やメタンの生成に阻害を及ぼさないことがわかる。したがって、高負荷域での酸やメタンの生成の遅滞は汚泥に吸着した脂質による阻害のためと考えられ、特にその影響はメタン生成に対して強く現われている。

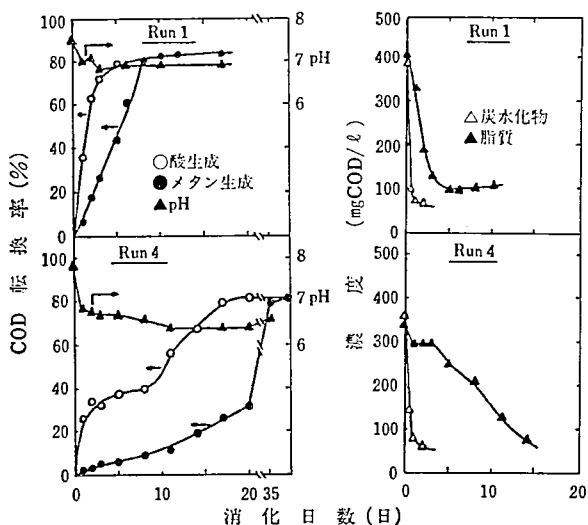


図 2 全乳における酸・メタン生成と成分別分解 (回分実験)

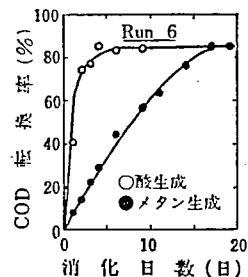


図 3 脱脂乳における酸・メタン生成 (回分実験)

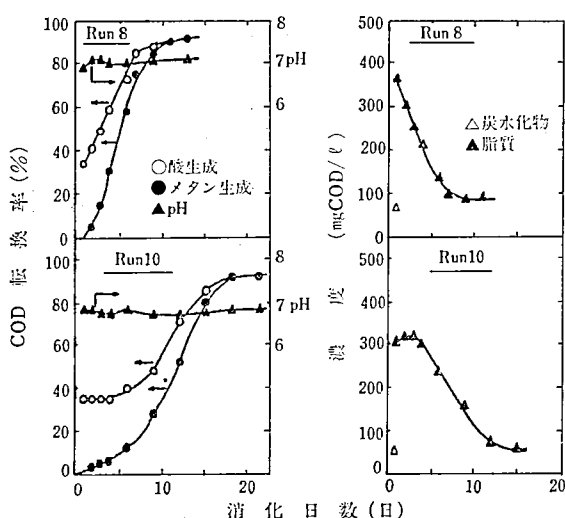


図 4 酸槽混合液における酸・メタン生成と脂質成分の分解 (回分実験)

3.1.2 酸槽混合液における基質分解と相分離の効果

図 4 は酸槽混合液すなわちある程度酸生成反応を受けた基質を投与した場合の酸・メタン生成と脂質分解を示したものである。但し、酸槽での滞留時間 1 日を加味して、図は消化 1 日目からデータをプロットした。高負荷の Run 10 は、先の Run 4 に比べて、メタン生成の長期遅滞が大幅に改善されている。一方、低負荷における Run 8 は、Run 1 に比べて、むしろわずかに酸生成が遅れる傾向を示した。それぞれの脂質分解は、Run 8 は Run 1 よりわずかに遅れており、Run 10 は Run 4 とほぼ同じ傾向であった。従って、Run 10 でメタン生成に対する脂質阻害がかなり緩和されたが、相分離が脂質の分解を促進しているのではないことがわかる。

メタン生成の改善に対する pH の影響をみると、Run 4 の pH が 6.5 まで低下 (図 2) したのに対し Run 10 では 6.8 (図 4) であり、両者に大差はなく、pH の影響は小さいと言える。また、揮発酸組成の影響をみるために、消化 1 日目の全乳および酸槽混合液の揮発酸組成を示したのが図 5 であり、これをメタン発酵開始時点での酸組成とみなした。図 5 によれば酢酸とプロピオン酸の蓄積濃度には両基質の間に大差はない。易分解性のノルマル酪酸については、メタン生成が順調に進行した酸槽混合液の方が高負荷域で濃度が低かった。したがって、揮発酸組成も Run 10 におけるメタン生成の改善にあまり関係していないと考えられる。

図 6 は各基質について酸およびメタンの生成量が COD 転換率で 80% に到達するのに要した日数を汚泥負荷ごとにプロットしたものである。酸生成については、脱脂乳との比較からも脂質成分による反応の遅滞が明らかであるが、汚泥負荷にかかわらず全乳と酸槽混合液の間に大差はなく、相分離の効果は小さい。一方、メタン生成については、汚泥負荷が高くなるにつれて相分離の効果が顕著になり、たとえば汚泥負荷 10 mg COD/mg MLVSS では相分離により消化日数を約半分に短縮できることがわかる。また、酸槽混合液のメタン発酵に要する日数は脱脂乳の場合と同程度で済み、脂質のメタン生成に対する阻害はかなり効果的に防止されているものと考えられる。この脂質阻害の緩和機構は、

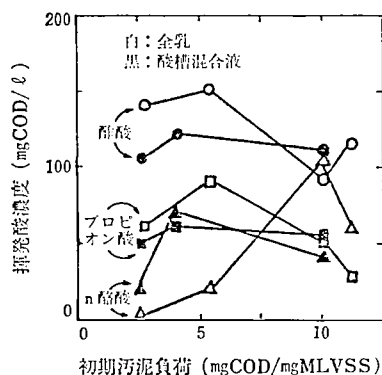


図 5 消化1日目の全乳および酸槽混合液の揮発酸組成 (回分実験)

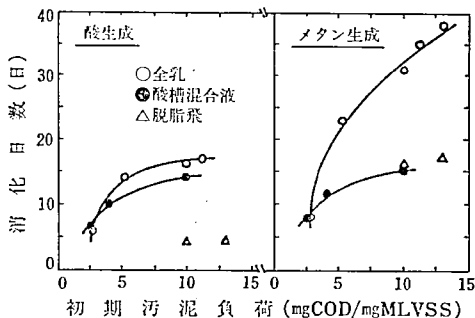


図 6 投与 COD の 80% 転換に相当する酸・メタン量の生成に要する消化日数 (回分実験)

推測の域を越えないが、基質中の脂質成分は酸槽ですばやく酸生成菌に吸着され、メタン菌に吸着するのを避けられるためであると考えられる。

3.2 連続実験

3.2.1 二相消化

基質の連続投与に先立ち、酸槽は 4 g、メタン槽は 6.6 g の種汚泥を接種した後、それぞれ10日および20日間の回分運転を行った。図 7 と図 8 は連続運転開始後の酸槽およびメタン槽での生成物と pH の挙動を示したものである。

図 7 に示されているように、酸槽でもメタン生成がみられたが、流入 COD に対するその転換率は 5% 以下であった。また、揮発酸は常に COD 転換率で約 40% の蓄積がみられた。これらのことは相分離が十分達成されていることを示している。消化60日目の前後でプロピオン酸の蓄積量が変動しているのは、混合液の攪拌が不十分であったためアセトジェニック菌やメタン菌が付着増殖したためと考えられる。一方、メタン槽においては消

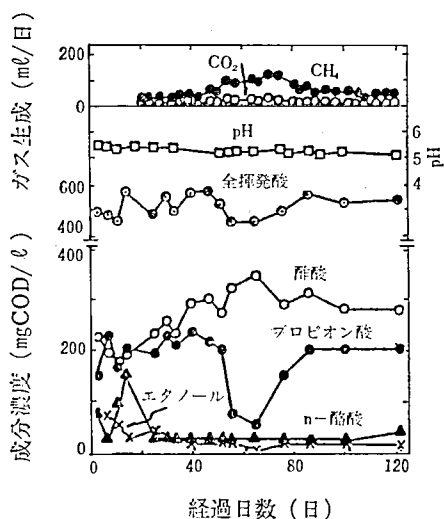


図 7 二相消化の酸槽における生成物と pH の挙動 (連続実験)

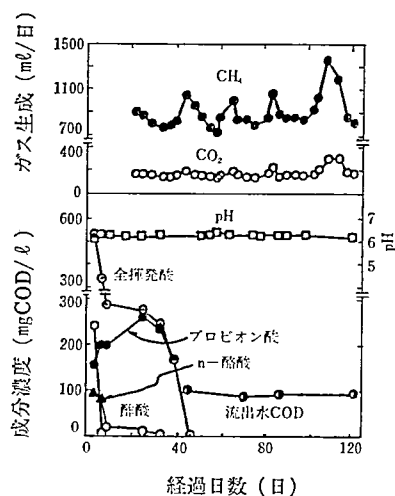


図 8 二相消化のメタン槽における生成物と pH の挙動 (連続実験)

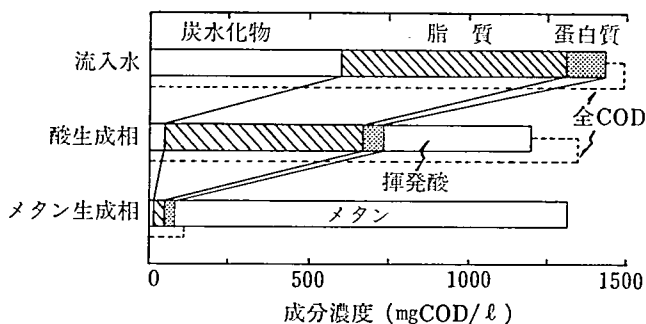


図 9 二相消化におけるミルクの成分別分解

化45日目以後揮発酸は全く検出されず、流出水 COD は約 100 mg/l で一定であった (図 8)。ガスは全消化期間を通じて活発に生成され、そのうち約 80% がメタンガスであった。

基質として用いた全乳の成分別分解は図 9 に示した通りである。先の回分実験でも述べたように、炭水化物の分解は非常に速く、酸生成相でそのほとんどが酸に転換されている。蛋白質は酸生成相で約半分が除去され、残りはメタン生成相で除去された。一方、脂質の除去は酸生成相ではほとんどみられず、大部分はメタン生成相での除去であった。しかしながら、高級脂肪酸の分析によれば、ミルク中の中性脂肪の 82% が高級脂肪酸に加水分解されており、しかもそのほとんどが汚泥中に存在した。検出された高級脂肪酸はオレイン酸とパルミチン酸であった。これらの結果は、中性脂肪は酸生成相で容易に加水分解を受け汚泥に吸着されるが、揮発酸 (低級脂肪酸) への分解までは進まないことを示している。また、脂質によるメタン生成への阻害は全くみられなかった。

3.2.2 単相消化

単相消化における基質投与は二相消化のメタン槽の連続運転開始条件とほぼ同じ条件で開始した。基質投与開始後のガス生成および揮発酸生成等をそれぞれ図 10 と図 11 に示し

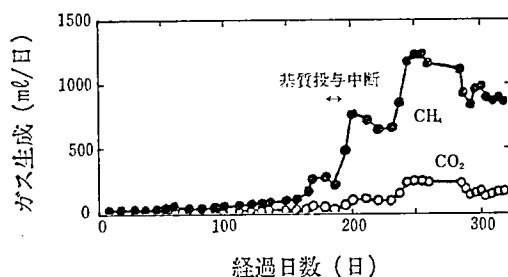


図 10 単相消化におけるガス生成 (連続実験)

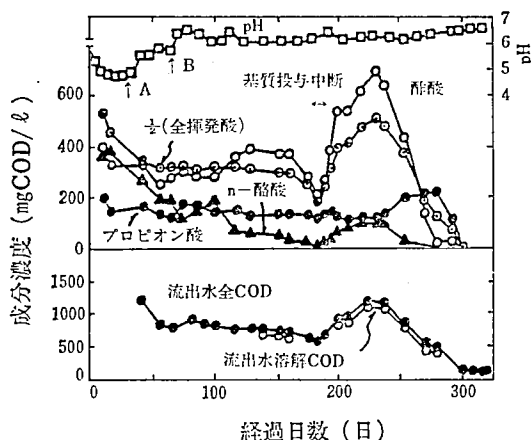


図 11 単相消化における生成物と流出水 COD の挙動 (連続実験)

た。図から明らかなように、メタンがほとんど生成されず、揮発酸が蓄積した状態が 150 日以上も続いた。連続運転開始直後から揮発酸が蓄積し、pH の低下がみられたので、図 11 の A と B 点でリン酸緩衝剤の添加量を増加させた。その結果、pH は 6.2 以上に上昇したが、メタン生成は改善されなかった。そこで、消化 180 日目から 2 週間基質投与を中断したところ、急激に酸生成およびメタン生成ともに活発になり、消化 300 日目ようやく揮発酸の蓄積はなくなり、メタン生成も安定した。系の安定後の流出水 COD は約 100 mg/l であった。

系が不安定であった消化 150 日目に流出水中のミルク成分を分析したところ、炭水化物と蛋白質はほとんど検出されず、脂質が約 30 mg/l の濃度で存在した。図 11 に示したように、流出水 COD のほとんどは溶解性であり、それは蓄積している揮発酸 COD とほぼ同濃度であった。これらの結果および炭水化物と蛋白質は流入水中に溶存していることから、流出水中の揮発酸は主として炭水化物と蛋白質の分解によって生成されたものと考えられる。従って、脂質について次の様な仮定が成り立つ。脂質は高級脂肪酸に加水分解され、槽内の汚泥に吸着されたが、細菌に対するその阻害のために分解されることなく槽内に蓄積していった。その結果、メタンはほとんど生成されず、揮発酸が蓄積し、pH が低下した。一方、高級脂肪酸の槽内蓄積により、図 11 に示されたように見掛け上流入 COD の約 50% が除去される結果となったものと考ええる。

3. 2. 3 相分離の効果

単相消化では、同じ運転開始条件にもかかわらず、系が安定するのに二相消化の場合の約7倍の日数を要した。これは回分実験でも見られたメタン生成の遅滞と本質的には同じであり、加水分解を受けて生じた高級脂肪酸が菌体に吸着して阻害を及ぼしているためと考えられる。従って、回分および連続の両実験から、相分離はアセトジェニック菌やメタン菌に対する高級脂肪酸の毒性を効果的に緩和するものと結論づけられる。これは高級脂肪酸が酸生成菌によって吸着され、メタン生成相における細菌群がその吸着を免れるためであり、酸生成菌自体は高級脂肪酸の吸着による致命的な阻害を受けないためであろう。

4. ま と め

本研究から得られた知見を要約すると以下のようになる。

- (1) ミルク中の脂質成分は容易に加水分解を受け高級脂肪酸になり菌体に吸着されるが、アセトジェニック菌やメタン菌に著しい毒性をもち、メタンの生成を阻害する。
- (2) 相分離を行うことによって、生成された高級脂肪酸は酸生成相の細菌群に吸着され、メタン生成相の細菌群はその吸着を免れるため、メタン生成への阻害は生じない。

5. 謝 辞

本研究を進めるに当たり有益な御指導を頂いた東京大学工学部の松尾友矩教授に深く感謝致します。なお、本研究の一部に本学の昭和59年度特別研究助成金を使わせていただきました。

参 考 文 献

- 1) 花木啓祐他, “嫌気性消化における種々の基質の分解過程 (II)” 下水道協会誌, Vol. 17, No. 196, 40 (1980)
- 2) Tanaka, S. and Matsuo, T. “Treatment Characteristics in the Two Phase Anaerobic Digestion System Using an Upflow Filter.” Preprint of IAWPRC's First Asian Conference (by JSWPR), p. 230 (1985)