

微生物による廃乳処理に関する検討

浅野 孝幸, 三津橋浩行, 鎌田 樹志, 佐々木雄真

Study on Biological Treatment of Wasted Milk

Takayuki ASANO, Hiroyuki MITSUHASHI, Tatsuyuki KAMADA, Takema SASAKI

キーワード：廃乳, 凝集, 固液分離, 高温好気発酵処理, 担体散水型好気処理, メタン発酵処理

1. はじめに

北海道は生乳生産量が全国の40%以上を占める酪農王国である。生乳は乳業メーカー工場に集荷され飲用乳などに加工され流通しているが、この過程で発生する廃乳の大部分は現在、廃棄物処理業者によって焼却処分されており、多大な石油資源を消費し、二酸化炭素を放出している。本道の優位性を活かした酪農業などの産業を強化し持続的に発展させ、さらに恵まれた環境を将来に引き継いでいくには廃棄物処理による環境負荷の軽減など、その周辺を支える技術開発が重要であることから、より経済的で環境負荷の少ない処理方法が望まれている。

一般的に経済的で環境負荷の少ない処理方法として微生物処理が知られている。しかし、廃乳は高濃度の脂質や蛋白質を含むため、一般的な微生物による排水処理方法を直接適用しても安定した処理が困難である。そこで廃乳に凝集剤を添加して凝集し、木質破砕物をろ材として自然脱水により固液分離した後、脂質や蛋白質を主成分とする固形分については高温好気発酵処理、炭水化物が残留する液分については担体散水型好気性処理およびメタン発酵処理を適用した微生物処理法について検討した。

2. 高温好気発酵処理の適正条件と廃乳処理フロー

高温好気発酵処理においては、吸水性や通気性に優れた木質破砕物を高温好気微生物の担体とし、処理対象物を例えば2日に1回の割合で供給し継続して長期間の発酵分解を行う。

良好な発酵状態を継続するには担体の水分を発酵に適した40～70%程度の範囲内に保つことが必要となる。供給する処理対象物の水分は通常これよりも高いため担体の水分が上昇するので、次に処理対象物が供給されるまでに発酵熱によって水分が蒸発し、もとの水分の状態に戻っていなければ処理対象物供給と発酵分解を繰り返す毎に水分が高くなり、ついには至適範囲を超えて良好な発酵状態を継続できなくなる。

これまで種々の有機性廃棄物について行われた研究例によれば、良好な高温好気発酵処理を継続するには処理対象物について $C/W > 2$ の条件を満たす必要がある¹⁾。ここでCは処理対象物の分解発熱量、Wは処理対象物の水分の蒸発潜熱である。廃乳については市販牛乳の性状と同じとして $C \sim 700$ kcal/kg、 $W \sim 520$ kcal/kg とすれば、 $C/W = 1.3$ となり上記条件を満たさないため、繰り返し処理を続けると徐々に水分が蓄積して発酵が困難になることが予想される。これを防止する方法として、(1)外部熱源による加温、(2)高発熱量物質(廃食用油など)の添加、(3)濃縮(脱水)が考えられるが、本研究では凝集後に固液分離して濃縮することを検討した。

本研究における全体の廃乳処理フローは図1のようになる。液分についてはBODがなお高濃度であるため排水処理施設が必要となる。既設の施設がある場合でも負荷を軽減する必要があると考え、前処理として担体散水型好気性処理およびメタン発酵処理について検討した。

事業名：一般試験研究

課題名：微生物による廃乳処理技術の開発

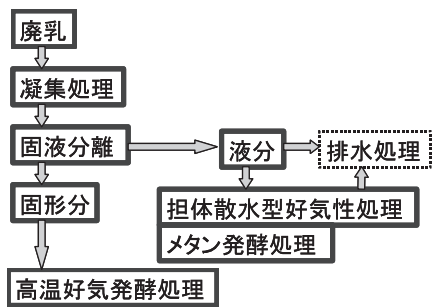


図1 廃乳処理フロー

3. 試験方法

3.1 凝集・固液分離による濃縮試験

凝集条件については、市販牛乳200mlに対して水処理用凝集剤ポリ塩化アルミニウム溶液 (Al₂O₃ 10%以上 道都化学産業(株)製 以下PAC) を攪拌しながら適量加え、凝集状態の外観や攪拌時の粘性、ろ紙 (5A) を敷いたブフナー漏斗 (径10cm) でろ過したときのろ過速度から比較検討した。また、最初にフライアッシュの微粉 (北電興業(株)製 JIS 灰) を添加しておき凝集への効果を見た。既存の方法との比較のため、牛乳の凝集に使用可能とされる凝集法2種^{2,3)}を用いて凝集後、同様にろ過を行い比較した。その凝集操作手順については図2に示す。

木質破砕物をろ材とする自然脱水による固液分離については、高温好気発酵処理用担体 (カラマツチップ) の新品あるいは処理に使用中のものをブフナー漏斗にろ材として厚さ1~2cmに敷きつめ、PACで凝集した市販牛乳600mLを注入して行った。

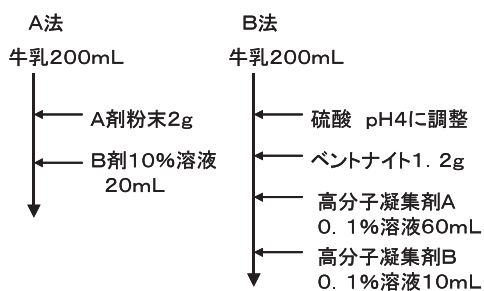


図2 既存の凝集方法例

3.2 高温好気発酵処理試験

試験装置の概略を図3に示す。外周をガラスウールで保温した容器に微生物担体となる木質破砕物として5Lのカラマツチップ (径1~4mm 図4参照) を充填し、底部から1L/分で通気した。カラマツチップはあらかじめ発酵に適した水分55%に調整しておいた。凝集した市販牛乳を固液分離して得られた固形分を供給するときは、カラマツチップを

取り出して固形分と十分に混合してから容器に戻した。高温好気微生物を植種するため、市販の発酵用微生物製剤を最初に固形分を供給するときのみ添加した。固形分の供給は2~3日に1回とし、1回につき市販牛乳0.6L分を20回にわたって供給した。凝集にはフライアッシュ3gとPACをpHが4になるよう添加した。自然脱水による固液分離には発酵処理試験に使用中のカラマツチップを一部抜き取りろ材とした。固液分離終了後のカラマツチップは固形分供給時に発酵容器に戻した。試験中は担体と室内の温度を連続記録し、固形物を供給する前後の担体の水分と重量を測定した。

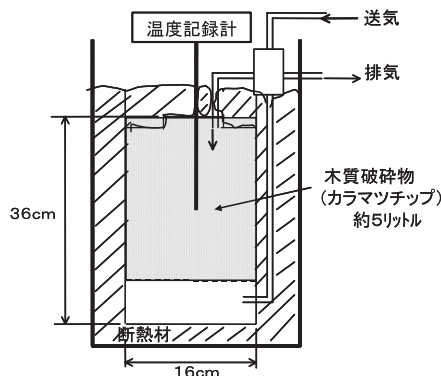


図3 高温好気発酵処理試験装置の概略



図4 高温好気発酵処理試験に用いた木質破砕物

3.3 分離液分の処理試験

3.3.1 担体散水型好気性処理試験

試験装置の概略を図5に示す。容器を網状板で仕切り、上部に約2Lのカラマツチップ (長径5~20mm 図6参照) を充填してろ床を形成した。ろ床には上部から1L/分で通気した。液受部に分離液分0.5Lを供給し、ポンプを5分間運転、25分間休止してろ床に間欠的に循環散水し、室温で1バッチ6日間の回分処理を行った。試験開始時には植種のため活性汚泥処理用の市販微生物製剤を添加した。また、最初は液分を希釈して低濃度の試料で試験を始め、徐々に供給する試料の濃度を高め最終的には無希釈で試験した。1日毎に液受部から試料の一部を採取しpH, TOC, BODを測定した。

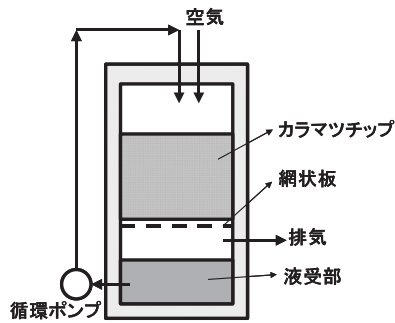


図5 担体散水型好気性処理試験装置の概略



図6 担体散水型好気性処理試験に用いた木質破砕物

3.3.2 メタン発酵処理試験

3.3.2.1 種汚泥の準備

試験に用いた種汚泥は、道内にある一般生ゴミのメタン発酵処理施設（中温発酵，55 t / 日）から入手した消化液を分離液分で馴養後，遠心分離および水洗後に再度遠心分離した脱水汚泥を用いた。

3.3.2.2 試験装置および試料調製方法

分離液分のメタン発酵処理試験は，図7に示すTestTube（最大容積63.5mL）を用い，回分試験により行った。TestTubeに種汚泥を投入し，液分を表1に示す汚泥VS比で加えた後，滅菌脱酸素水で全量20mLに調製した試料をn = 3で準備した。各TestTube内部をN₂ガスで置換後，ブチルゴム栓で密封し，36℃の恒温槽に静置した。

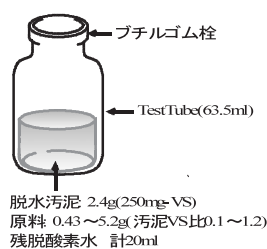


図7 回分試験装置（TestTube）

表1 投入試料

試料 No.	種汚泥		分離液分		汚泥 VS比
	g	VS mg	g	VS mg	
1	2.3	250	0.43	25	0.1
2	2.3	250	0.87	50	0.2
3	2.3	250	1.7	100	0.4
4	2.3	250	3.5	200	0.8
5	2.3	250	5.2	300	1.2

3.3.2.3 測定方法

数日毎にTestTube気相部の組成ガス分圧をガスクロマトグラフ（SHIMADZU GC-8A，PorapakQカラム：50℃，TCD検出器：100℃，Heキャリアーガス：50ml/min）により分析し，メタン濃度および前分析時との圧力差からバイオガス生成量を算出した。分析毎にガス抜きおよび振とうによる攪拌を行い，36℃の恒温槽に静置した。

4. 試験結果と考察

4.1 凝集・固液分離による濃縮試験

市販牛乳にPACを攪拌しながら少量ずつ添加すると，pH5付近から凝集してヨーグルト状になり，攪拌時の粘性が高まる現象が見られた。しかし，固形分が多いためフロックの形状は観察不能であり，沈降もしないため外観上の違いによる凝集状態の良否についての判別は困難であった。この凝集物をろ過するとpH4付近においては100分ほどで約100mLの淡黄色で透明な液分と豆腐程度の固さのある水分80%前後の固形物が得られた。しかし，pH5付近ではろ過速度の低下と液分の白濁化が観察された。pH3付近ではpH4付近の結果と大きな差がなかった。以上の結果に併せ，既存の方法においても蛋白質の凝集が起きるpH4が最適とされているので，本法においてもPAC添加量をpH4になるよう調整することが最適条件と考えられた。必要なPAC添加量は2.5～3.0 vol%であった。

一般的な排水の凝集処理において無機物微粉を少量添加することで良好な凝集状態にできる例があることから，PACとともにフライアッシュを1～2 g添加することを試みたが，外観，ろ過速度においては無添加の場合との差は僅かであった。

本法と既存の方法によって凝集した牛乳のろ過速度を比較したところ，本法とA法はほぼ同じであるが，B法は極めて速やかにろ過が可能であった。各々の方法によって凝集剤液の添加量が大きく異なるため，牛乳の水分100mLと加えた凝集剤液の水分がろ液として得られるまでの時間を比較した。その結果，本法では100分（ろ液106mL），A法では100分（ろ液120mL），B法では23分（ろ液170mL）となった。本法は高分子凝集剤液の調製が不要であること，添加量が少な

いことが特徴であり、より実用的と考えられる。

木質破砕物をろ材とする自然脱水による固液分離については、上述のろ紙と同様に良好な固液分離が可能であった。新品のカラマツチップでは自重の約3倍の吸水能力があり、附着水を含めると固液分離後は重量が4倍以上になった。発酵処理に使用中のカラマツチップの場合は2倍程度であった。固液分離後のカラマツチップを発酵容器に戻すことを考慮すると、水分の持ち込みを少なくする必要があるため、発酵処理に使用中のカラマツチップをろ材とするのが適当と思われる。図8に脱水された牛乳凝集物の写真を示す。また、得られた固形分と液分の性状分析例を表2に示す。液分の全窒素、ヘキサソ抽出物質の分析値が非常に低いことより、蛋白質、脂質のほとんどが固形分側に濃縮されたことがわかる。液分のBOD、TOCは牛乳に3~4%含まれている乳糖に起因するものと考えられる。

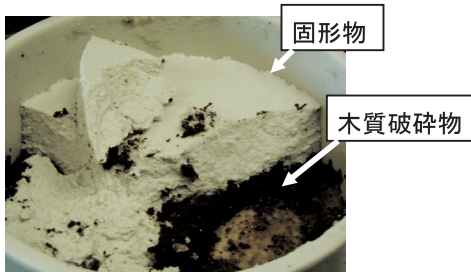


図8 木質破砕物ろ材上での牛乳凝集物の自然脱水

表2 固形分及び液分の分析結果

液分(mg/L)	固形分(%)
BOD 20000	水分 76
TOC 18000	灰分** 7.9
T-N 290	
Hex* 30	

* ヘキサソ抽出物質 ** 乾物ベース

以上の凝集・固液分離による濃縮の試験フロー例を図9にまとめて示す。また、市販牛乳600mLを濃縮して得られた固形分等のC/W比の計算結果を表3に示す。

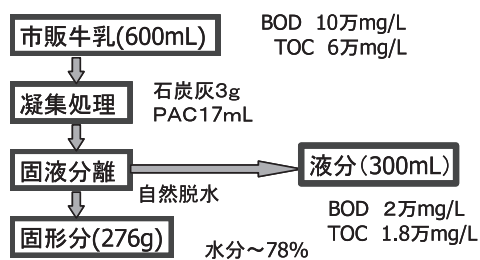


図9 凝集・固液分離による濃縮試験例

表3 濃縮処理後のC/W計算例

	牛乳 600mL	濃縮処理後		
		固形分	木質 破砕物	液分
含水量(g)	553	215	38	300
W(kcal)	300	116	20	160
C(kcal)	408	360	6	40
C/W	1.4	3.1		
		2.7		

Cの計算においては牛乳の栄養成分表示エネルギー値を牛乳と液分のBOD値を用いて固形分と液分とに按分した。その結果、固形分のみでは3.1、ろ材の木質破砕物を含めても2.7となり、良好な高温好気発酵処理を継続するためのC/W>2の条件を満たしていることがわかる。

4.2 高温好気発酵処理試験

供給された固形分に含まれる脂質、蛋白質などの有機物が高温好気細菌によって発酵分解される時に発生する発酵熱によって試験容器内の温度は徐々に上昇し、最高で70℃に達した。有機物が少なくなると発酵熱の発生量が低下して徐々に温度が下降し、およそ2日後には始めの温度に戻るといった周期的な変動を示した。図10は試験を開始してから固形分を4回供給する間の容器内温度の経時変化を示している。このように固形分の供給に連動して温度が周期的に変化しており、最高温度も60℃を超えていることから良好な処理状態であり、担体5Lに対して2~3日に1回、牛乳0.6L分の固形分供給は適正な負荷であると考えられる。このBOD負荷量の平均値を計算すると4.2 kg/m³・日となった。この負荷量は高温好気発酵に適するとされる3~10 kg/m³・日⁴⁾の範囲内となっている。

固形分のpHは4を示し酸性であるがその影響はみられなかった。発酵が進むとアンモニアが生成し担体は弱アルカリ性を示すので中和されるものと思われ、担体が酸性化することにはなかった。

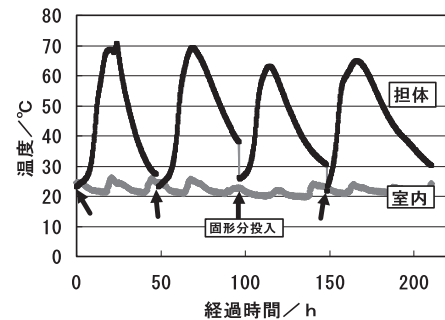


図10 高温好気発酵処理試験中の担体温度の変化

図11に固形分を供給混合直後と発酵処理が終了し次の固形分を投入する直前の担体水分を示す。試験初期には50~60%であったがその後は徐々に低下し40~50%となった。これはC/W比が2.7と高いことにより過度に水分蒸発が促進されたためと考えられる。梁ら¹⁾によればC/W比を2.18とした高温好気発酵実験において水分が一定に維持されたと報告しており、本試験の2.7では高すぎることがわかる。そこで11回目以降には3回に渡って固形物供給時に水を50~100mL加えてC/W比を約2.4に調整した結果、水分の低下は止まり、40%前後を維持するようになった。

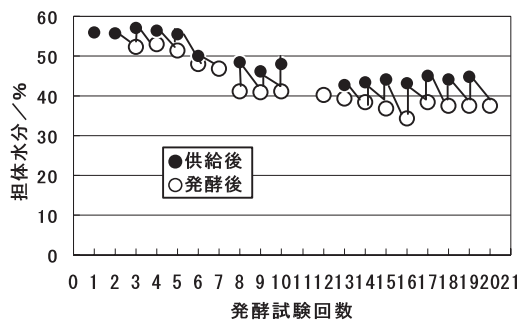


図11 高温好気発酵担体の水分の推移

図12には処理した牛乳量と担体の乾燥重量変化を示す。

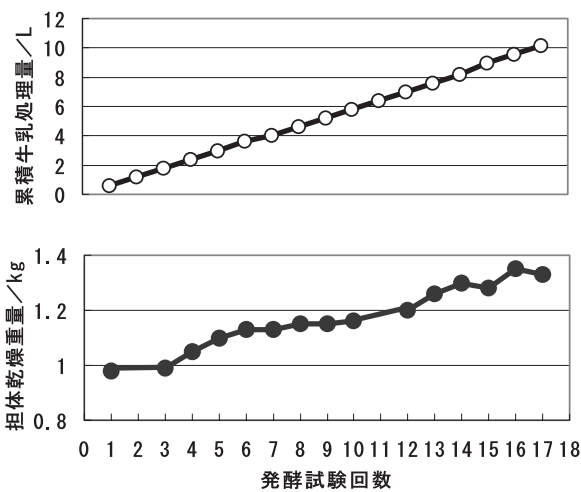


図12 高温好気発酵処理試験における担体重量の推移

牛乳10Lの凝集固形分を1kg(高容積5L)の担体を使って処理した結果、約0.4kgの残渣が担体中に残ったことがわかる。残渣の内容として牛乳の灰分(0.7%),凝集剤のPAC,フライアッシュが考えられるが、それぞれ、0.08kg,0.04kg,0.05kg程度と推定され、残りの0.2kg強は牛乳の脂質等の有機物あるいはそれらの代謝物と思われる。未分解物が蓄積した結果、担体の吸水性は初期に比べて低下しており、粘着性を示すなど微生物担体としての機能は低下していたので、この時点では未だ使用可能であったが、やがて交換する必要がある

生じるものと思われた。使用後の担体は堆肥原料としての利用が考えられる。

4.3 分離液分の処理試験

4.3.1 担体散水型好気性処理試験

無希釈液分の処理試験におけるBOD測定結果を図13に示す。供給した液分のBODは1.6万mg/Lであったが、1回の循環散水で1.2万mg/Lとなり、1日後には3100mg/Lまで急激に低下していた。しかし、その後の変化は緩やかであり、6日後には440mg/Lとなった。初期の急激なBODの低下は、回分式生物処理で一般的に見られるように、液分中の有機物が生物膜に吸着することに起因すると思われる。したがって吸着した有機物を分解するためには1日の処理時間では不十分であり、数日間は要するものと考えられる。なお、TOCについてもBODとほぼ同様の経時変化を示した。

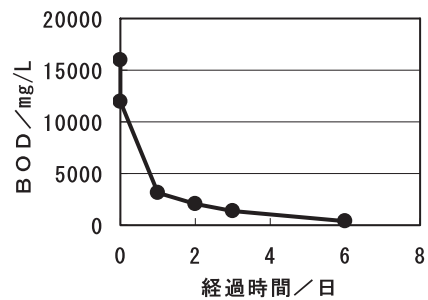


図13 担体散水型好気性処理試験におけるBODの経時変化

発酵処理に使用中のカラムチップをろ材として得られた液分は付着している分解生成物によって中和されpHは6程度となっているが、処理液では約4となり酸性を示した。液分の主成分は乳糖と考えられるので、処理過程で乳酸が生成して酸性になるものと推定される。

このように、本格的な排水処理施設を用いなくても分離液分を前処理できる見通しを得ることができた。

4.3.2 メタン発酵処理試験

分離液分のメタン発酵処理における分解率の経時変化を汚泥VS比毎に図14に示した。また、31日目のバイオガス生成量およびCH₄濃度を表4に示した。分解率は理論バイオガス生成量に対する測定生成量の百分率であり、理論バイオガス生成量は液分中のVS成分が炭水化物と仮定して化学量論式より0.83 Nm³/kgVSと算出した。

分離液分は、汚泥VS比0.4以下の試料で80%以上まで分解された。しかし、0.8以上の試料では分解率が33%以下であり、CH₄濃度も22%以下であった。

既報²⁾において、汚泥VS比が0.4を超える試料では、分解

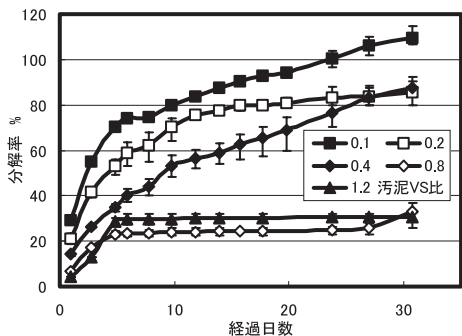


図14 分離液分のメタン発酵処理

表4 メタン発酵処理結果 (31日目)

試料 No.	汚泥 VS比	分解率 %	ガス生成量 m ³ /kgVS	CH ₄ 濃度 vol.%
1	0.1	109	0.91	68.1
2	0.2	85	0.71	64.0
3	0.4	87	0.73	60.5
4	0.8	33	0.27	21.3
5	1.2	30	0.25	2.1

率が低く、VFA（揮発性脂肪酸）の高濃度蓄積による発酵阻害が認められている。本試験でも汚泥VS比0.8以上では、同様にVFA蓄積による発酵阻害によりメタン化が進行せず、CH₄濃度および分解率が低かったものと思われる。

以上から液分を31日間でメタン発酵処理するためには、汚泥VS比0.4以下であることが必要である。一方で、汚泥VS比0.1の試料では分解率が100%を超えており、汚泥の自己消化に伴うバイオガス生成の可能性が考えられる。自己消化により汚泥が減少した場合、発酵能力の低下が予想されることから、汚泥VS比を0.2以上とするか、発酵処理の所要日数を31日より短期間にする必要があると考えられる。

5. まとめ

廃棄物処理場において適用可能な微生物による廃乳処理法の開発を目的として、市販牛乳を試料として用い、凝集剤を添加して凝集し、木質破砕物をろ材として自然脱水により固液分離した後、脂質や蛋白質を主成分とする固形分については高温好気発酵処理、炭水化物が残留する液分については担体散水型好気性処理およびメタン発酵処理をそれぞれ適用した微生物処理法について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 凝集剤としてPACをpH4となるまで添加し、高温好気発酵処理で微生物担体として用いる木質破砕物をろ材として自然脱水により固液分離することにより、水分80%前後の固形分と蛋白質、脂肪分が除去された液分が得られた。
- (2) 固形分はBOD負荷4.2 kg/m³・日での高温好気発酵処

理において60℃を超える最高温度を示し、良好な処理が継続可能であった。

- (3) 液分を担体散水型好気性処理することにより、BODを1.6万mg/Lから1,000以下に下げることができた。
- (4) 液分をメタン発酵処理することにより、汚泥VS比0.4以下の試料で80%以上の分解率が得られた。

謝辞

本研究を行うにあたり、試料の提供をいただいた井上孫株式会社、ハイモ株式会社、株式会社ロム、中空知衛生施設組合並びに試験に協力をいただいた樋口央紀氏（元株式会社生物有機化学研究所研究員）に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 梁 在璟・清水由紀子・趙 敬淑・森 忠洋：高濃度有機排水の高温・好気処理におけるカロリー/水 (C/W) 比の重要性, 水環境学会誌, Vol.18 No.7, pp.583-588, (1995)
- 2) 新脱水処理剤ウエスタック技術資料, ウエスタック研究所
- 3) 特許第3547113号, 廃牛乳の処理方法
- 4) 森 忠洋・梁 在璟・蔡 恵良：微生物を活用した有機廃棄物の分解, 食品機械装置, No.3, pp.65-69, (1995)
- 5) 三津橋浩行・浅野孝幸・鎌田樹志・佐々木雄真：有機性廃棄物のメタン発酵処理特性, 北海道立工業試験場報告, No.305, pp45-50, (2006)