

シロップ廃液のバイオガス化およびコジェネレーションシステムの開発

食品環境科 環境スタッフ	酒井 奨 松本 豊*
渡辺建設株式会社	増田直己
山梨罐詰株式会社	松尾朋美 望月光明

Investigation of Cogeneration System by Biogas from Syrup Waste

Susumu Sakai, Yutaka Matsumoto, Naoki Masuda, Tomomi Matsuo and Mitsuaki Mochizuki

It is confirmed that energy recycling system from syrup waste at canning plant has a lot of benefits. Biogas was generated about 300-650mL/g-TS/day from the syrup waste by methane fermentation technique. Same potentialities were obtained even if methane fermentation operated in 12m³ tank scale under feeding less than 10g-TS/L/day. The syrup waste of 2,500kg/day will make biogas of about 188m³/day, and gas-engine supplies electric power and heat to the plant with it. This cogeneration system lightens about half of cost imposed on the charge of drainage treatment in the company. It was also found that the cogeneration system provided the electric power with ¥16/kWh without any funds for building if 10 years repayment is considered. It means more financial benefits lies on this system under any funds from country or municipality. Furthermore, the proposed system reduces the emission of carbon dioxide of about 175.7 ton-CO₂/year from the plant. Under these findings, our proposed system has a lot of merits financially and environmentally.

1. はじめに

約400年前にフランスで発明された食品缶詰は、今や世界中で生産され、その種類は1,200種類を越えると言われている。缶詰は長期保存ができ、その殆どが殺菌済みであるため食中毒にもなりにくく、湯煎加熱などの簡単な前処理で食せるものや、開封してそのまま食せるものなど、その手軽さが大きな市場を獲得している。

(社)日本缶詰協会の調査によると、現在、みかん、桃、パイナップルなどの果実缶詰の国内における生産量は、10年前の半分以下の約4万トンに留まっている。これは缶詰以外の加工食品の台頭もさることながら、中国をはじめとするアジア圏からの逆輸入の構図が浮き彫りになってきている。2006年度の調査報告¹⁾によると、桃缶、パイナップル缶、柑橘類缶(みかん)の主要3缶詰に対する年間総輸入量は、約18万トン(内訳は桃缶32%、パイナップル缶28%、柑橘類40%)にも上っている。この事は、静岡県内の缶詰工場の生産形態をも変化させた。例えば、県

内の代表的な果樹であるみかんの缶詰生産を実施していた工場は、かつて数多く存在していたが、現在は皆無となっている。今やみかんをはじめとする果実缶詰のほとんどは海外から輸入されている。県内の缶詰工場では、輸入された果実缶詰は、シロップ液と果実とに分離され、国内の消費者向けに調整された新たなシロップ液を工場内で製造し、果実と合わせて販売している。従って新たに海外からのシロップ廃液が生じ、排水処理に回されるか、希釈処理により、下水道放流されている。この排水処理に伴う電気料金、余剰汚泥処理費、薬品費、下水道料金などは、企業の経営を大きく圧迫している。

そこで本研究では、排水処理への負担を軽減することを目的に、メタン発酵技術とガスエンジン技術を組み合わせたシロップ廃液からのエネルギー回収システムを提案した。本報では、シロップ廃液の現状調査とメタン発酵の実験結果に基づきながら、工場内に設置できるコジェネレーション(熱電併給)システムの可能性とその将来性について報告する。

*) 現 食品環境科長

2. シロップ廃液

山梨罐詰株式会社（静岡市清水区、以下山梨罐詰）は、レトルト食品やカップデザート、水産品や果実の缶詰製造、販売を手掛けている。先述の通り、山梨罐詰に輸入される果実缶詰は、果実とシロップ液に分けられる。缶詰の約40wt%を占めるシロップ液は、山梨罐詰の工場内にある活性汚泥式排水処理施設で処理され、河川放流されている。

表1にシロップ廃液の性状を示す。シロップ廃液は、その主成分がショ糖からなり、他にビタミンCやクエン酸、メチルセルロースなどが少量含まれている。糖度（Brix）で約15%、有機物濃度（TS）では12~14%にも達する。山梨罐詰に限らず、全国に約450を数える缶詰工場（約350社）の共通の課題として、この廃液に対する排水処理の経済的な負担が挙げられている。事実、山梨罐詰でのシロップ廃液に対する排水処理への費用負担は、全体の約2/3を占めるに至っている。

図1は、平成19年4月から平成20年1月までの10ヶ月間に山梨罐詰から排出されたシロップ廃液量の推移を示す。これは月間の総排出量を、土日祝日の操業休止日を除いた稼働日で割った、月別の平均排出量をまとめたものである。冬季より夏季の排出量が比較的多いなど、季節間のばらつきはあるものの、平均すると約2,205kg/日のシロップ廃液が排出されている。平成19年度に排水処理に掛かった費用（汚泥処理費、電気代および薬品費など）は総額約1,000万円にも達している。本報では、経営を圧迫するこのシロップ廃液から、メタン発酵技術とガスエンジンによりエネルギーを回収することで、どの程度のメリットがあるのかを次章以降で検討する。

3. メタン発酵によるバイオガス化

本研究では、シロップ廃液からメタン発酵技術によりバイオガス（メタンガス）を発生させて、エネルギー変換することにより、電力と熱を回収する。メタン発酵については、表1のようにシロップ廃液の主成分がショ糖であり、SS成分（浮遊懸濁物濃度）も少ないため、グラニュー状菌体を用いたUASB（上向流嫌気性汚泥床）型メタン発酵法²⁾が適用でき

表1 シロップ廃液の性状

シロップ廃液	成分	糖度 Brix. [%]	pH	全蒸発残留物 [%]	有機物 [%]	無機物 [%]	SS [mg/L]	TOC [mg/L]
みかん	ショ糖	15.4	4.3	12.2	12.0	0.2	170	72,600
パイナップル	ビタミンC クエン酸	14.9	4.2	13.6	13.5	0.1	720	71,300
混合	メチルセルロース	15.2	4.2	13.0	12.8	0.2	400	71,000

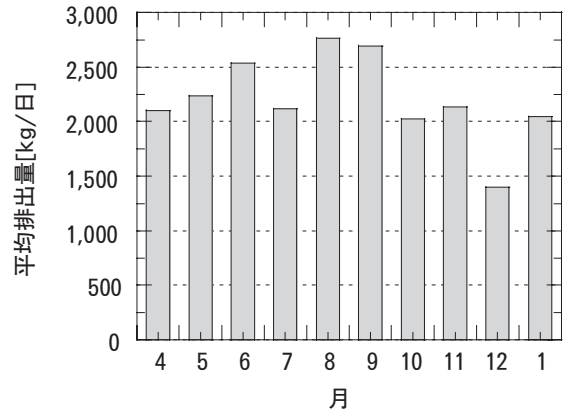


図1 シロップ廃液の排出量 (平成19年度)

ると判断した。

3.1 発酵試験（ビーカースケール）

シロップ廃液をメタン発酵させるにあたって、その能力を測るため、まずは実験室で発酵試験を行なった。容積1Lの丸底セパラブルフラスコ内に約0.7Lのグラニュー菌を含んだ発酵液（汚泥濃度MLSSは約27,000mg/L）を入れ、約60rpmで緩やかに攪拌するとともに、約38℃のウォーターバスの中に保持した。実験装置は既報^{3,4)}と同じものを用いた。原料のシロップ廃液は適宜希釈し、約70mL/日ずつ発酵槽に投入するとともに、処理液を同量抜く作業を繰り返した。滞留日数は10日間であった。シロップ廃液は表1のように栄養バランスが偏っているため、液中の炭素量に対し、尿素による窒素源とリン酸二水素カリウムによるリン源を加え、その割合をそれぞれC/N=15、C/P=100になるように調整した。シロップ廃液の希釈については、メタン発酵槽に投入する有機物負荷量を定め、0.9から8.6g-TS/L/日まで変化させて実験を行なった。

図2に有機物負荷量の変化と発酵液のpHの変化を、図3に発酵によるTOC（全有機炭素量）の除去率を、そして図4にバイオガスの発生量を示す。有機物負荷量が8.6g-TS/L/日に達するとややpHが

減少し始めたが、全体を通してほぼ一定でコントロールできた。発酵は30日目以降に馴養が進んで安定し、TOC除去率は約80%でほぼ一定となった。バイオガスは有機物負荷量の増加とともに減少したが、発酵が安定する30~60日目に約300~650mL/g-TS/日のガスが得られた。この値は、生ごみを原料にしたメタン発酵処理の既報の結果⁵⁾とほぼ一致した。また、図中には示していないが、バイオガス中のメタン、二酸化炭素の濃度は、それぞれ53%、41%となり、ややメタン濃度が低いものの既報値⁵⁾とほぼ一致した。残り約6%は窒素であったが、これは発酵槽内を嫌気状態にするため、窒素で置換した影響が出たものと考えられる。その他、硫化水素は10ppm以下と少なく、アンモニアに至っては全く検出されなかった。これは、シロップ廃液の主成分がショ糖であり、その他の成分が殆ど存在しなかったためと考えている。

以上、ビーカースケールの実験ではあるが、有機物負荷量を10g-TS/L/日以下で制御すれば、シロップ廃液をメタン発酵することは容易であることが確認できた。

3.2 発酵試験(ベンチスケール)

酒井らは、学校給食センターの生ごみを利用したメタン発酵の実証試験を実施している^{6,7)}。平成17年度末に完成した同設備は、平成18年度にメタン菌の馴養運転を実施したが、馴養原料にシロップ液を利用した⁸⁾。発酵槽の大きさは約12m³、シロップ廃液の発酵槽への投入量は、馴養期間であったため約48L/日と非常に小さかった。シロップ廃液の性状はほぼ表1と同じで、希釈せずにそのまま発酵槽に投入した。栄養源については、学校給食センターの生ごみを少量加えて調整した。この時の有機物負荷量は約0.48g-TS/L/日、滞留日数は約8ヶ月であった。図5に発酵槽内のTOCおよびSSの変化を、図6にバイオガス発生量を、そして図7にバイオガス中のメタン、硫化水素、アンモニアの濃度変化を示す。SS、TOCとも約3,000mg/L前後で安定して処理できた(図5)。シロップ廃液のTOCが約70,000であったことから(表1)、TOC除去率は約96%にも達している。バイオガスは3~6 m³/日発生して

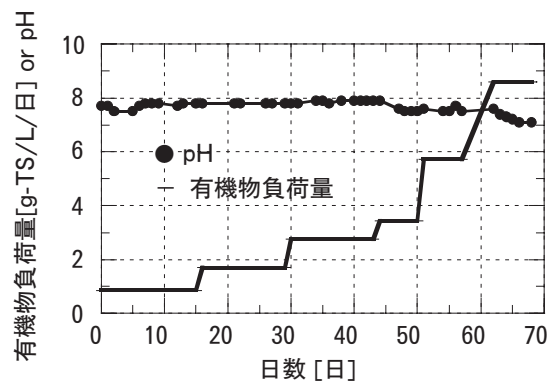


図2 有機物負荷量とpHの変化 (ビーカースケール)

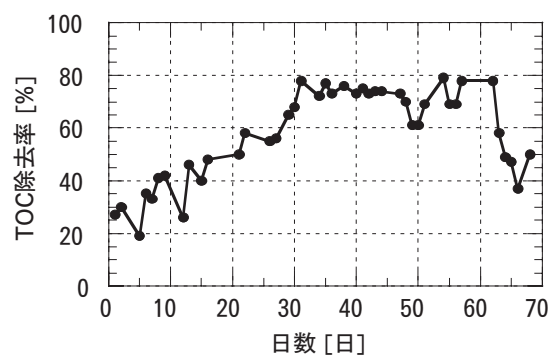


図3 TOC除去率の変化 (ビーカースケール)

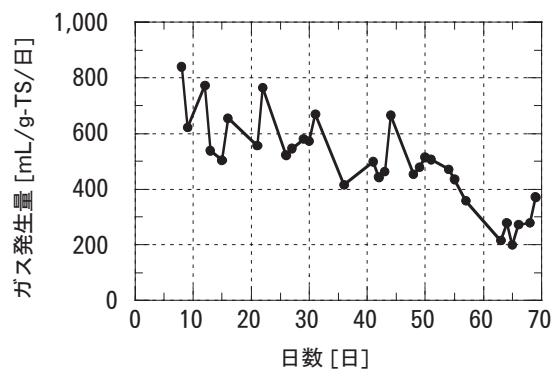


図4 バイオガス発生量の変化 (ビーカースケール)

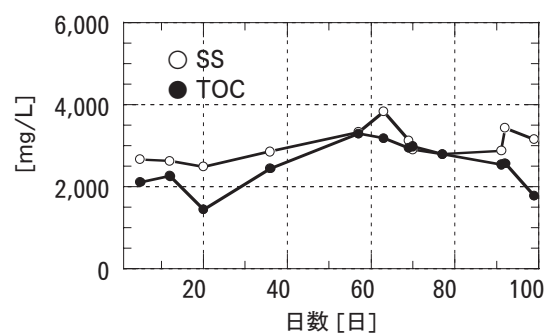


図5 SSおよびTOCの変化 (ベンチスケール)

おり (図6)、520~1,042 mL/g-TS/日に相当する非常に高いガス発生率を得た。バイオガス中のメタン濃度は約60%、硫化水素やアンモニアについては殆ど検出されず (図7)、3.1節のビーカースケールでの実験結果と一致した。

以上、ベンチスケールでのメタン発酵試験でも、シロップ廃液からのバイオガスの回収は可能であることが確認できた。さらにシロップ廃液は生ごみのように破碎や摩砕のような前処理が不要なため、より経済的にバイオガスを回収できる。そしてバイオガス中に硫化水素やアンモニアなどの不純物が殆ど含まれないため、ガスの脱硫、脱臭工程などが簡素になるという利点も確認できた。

4. コージェネレーションシステム

3章までの検証から、図8のようなコージェネレーションシステムを考案した⁹⁾。山梨罐詰から排出されるシロップ廃液量 (メタン発酵処理する廃液量) を、図1で調査した平均排出量よりやや多めの2,500kg/日に設定した。無希釈で発酵槽に供給して滞留時間を約10日間とすると、25m³の発酵槽が必要となる。この時、シロップ廃液中の有機物濃度 (TS) を15%とすれば、有機物負荷量は15kg-TS/m³/日となり、3章で推奨した値の1.5倍の負荷量がメタン発酵槽に掛かることになる。そこで、有機物負荷量を軽減させるために発酵槽の容量を大きくするが、滞留時間を維持することや、図1のような廃液排出量の変動への対応、メンテナンス性の向上、さらには発酵に最適なグラニューロ菌の育種培養の場を設けるなどの点に配慮して、本研究では15m³のメタン発酵槽を2槽用意することにした。筆者らはこれを「デュアルメタン発酵法」と呼んでいる。

有機物負荷量に対するバイオガスの発生率を、3章の検討結果から500mL/g-TS/日程度と仮定すると、2,500kg/日のシロップ廃液からは約188m³/日のバイオガスが発生する。このガスをバイオガス用に市販されているY社製の国産25kW級ガスエンジンに供給する。バイオガス中のメタン濃度を60%と仮定すると、このガスエンジンに必要なバイオガス供給量は、17.85m³/hである (カタログ値)。一方、

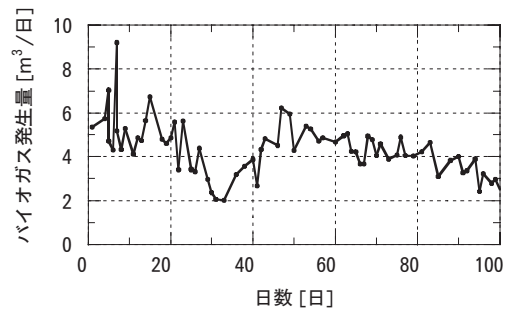


図6 バイオガス発生量の変化 (ベンチスケール)

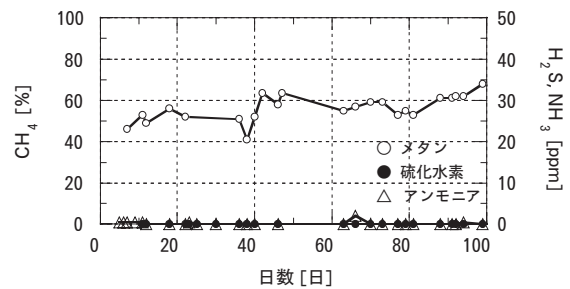


図7 バイオガス中の成分変化 (ベンチスケール)

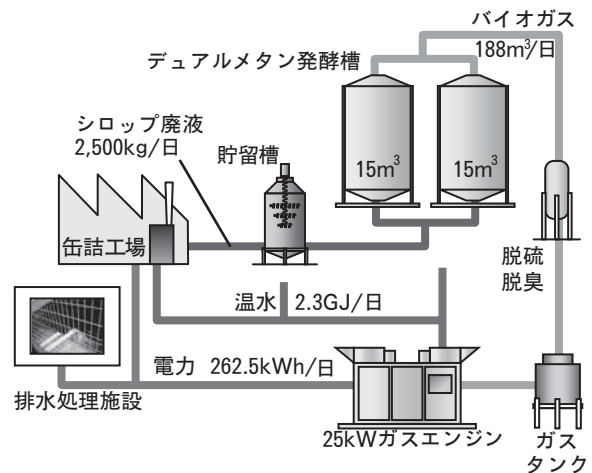


図8 コージェネレーションシステムのフロー図

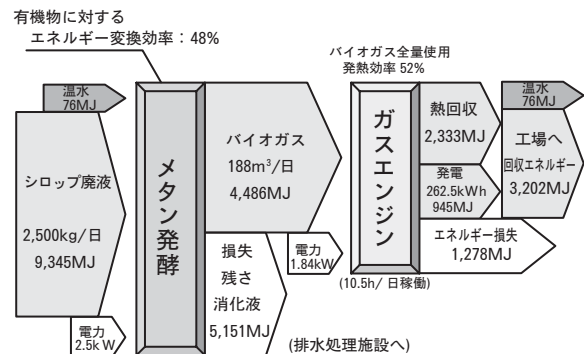


図9 システムのエネルギーバランス (1日当たり)

【報告】

発生するバイオガスは188m³/日であるから、供給量は約7.81m³/hにしか満たない。従って夜間休止するなど、ガスエンジンの稼働時間を10.5h/日の間欠運転とする。

図9にシステム全体のエネルギーバランスを示す。3章よりメタン発酵のTOC除去率は約80%であり、バイオガス中のメタン濃度は約60%であるから、メタン発酵槽のエネルギー変換効率は約48%として計算した。メタン発酵槽を稼働させるのに必要な電力(ポンプ、攪拌など)を約2.5kW、保温のために使用する温水を約76MJ/日分(45°Cの温水で約722L/日分)と仮定した。この温水はガスエンジンで発生する熱の一部を利用して作る。ガスエンジンの能力は発電効率32%、発熱効率52%であり、稼働に必要な電力は約1.84kWである(カタログ値)。発生した電力と熱は排水処理施設や工場内で利用する。図から、投入エネルギー量に対する回収エネルギー量の割合(システムの全エネルギー変換効率)は約33%となった。投入エネルギー量のうち、シロップ廃液の持つエネルギーを除くと(使用する商用電力のみを考慮すると)、投入エネルギー量の約10倍のエネルギーが回収できることも分かった。

5. 経済性(発電コスト)

表2(a)にイニシャルコストおよび年間のランニングコストを、表2(b)に排水処理への負担軽減による回収コストと、ガスエンジンの発生エネルギーによる回収コストを示す。排水処理の負担軽減量については、排水処理負荷のうち2/3がシロップ廃液に起因していたことと、メタン発酵によるTOC除去率が約80%であることから見積もった。システムの年間稼働日数を250日/年とし、試算した発電コストを表2(c)にまとめた。なお発電コストの計算には、システムを建設する際の国や自治体からの補助金の有無や、償却年数をパラメータにし、(1)式を用いた。

$$C = (I(1-S)r + R-M)/E \quad (1)$$

ただし、C:発電コスト[円/kWh]、I:イニシャルコスト[円]、S:補助率、r:年経費率、R:ランニングコスト[円]、M:回収コスト[円]、E:年間発電量[kWh]

である。年経費率rについては、償却年数n、利子率iとして(2)式より求めた。

$$r = i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1) \quad (2)$$

表2(c)から、補助金を得ず設備を建設した場合でも、10年間の償却で商用コストと見合う。補助金を期待すれば、さらに高い経済性と事業性が見込めることが分かる。なお表中のマイナス値は、余剰電力として売電すれば利潤が見込めることを意味するが、これには電力会社との系統連系の強化が望まれる。

表2 各種コスト試算

(a)	対象	内容	[千円]
イニシャル	メタン発酵システム	貯留槽、メタン発酵槽、ポンプ、攪拌機など	43,500
	発電システム	脱硫塔、ガスタンク、ガスエンジンなど	24,500
ランニング	システム全体	電気代、薬剤費、設備保全費など	2,050

(b)	対象	内容	[千円]
回収コスト	排水処理	処理費用×負担軽減率 約53%	6,399
	ガスエンジン	電力 65,625kWh/年×19円/kWh	1,247
		熱 2,257MJ/日→12,342m ³ /年(13A)×170円/m ³	2,098

$$i = 0.03 \quad (3\%)$$

(c)	補助金有無	5年償却	10年償却
発電単価 [円/kWh]	補助金なし	109.0	4.2
	1/3補助	33.6	-36.3
	1/2補助	-4.1	-56.5

6. 環境特性(二酸化炭素排出削減量)

表3に二酸化炭素排出削減量をまとめた。排水処理にはこれまで年間232.3MWhの電力を要してきたが、処理量が約47%に軽減されることから、約108.4MWhで済む。さらにガスエンジンにより年間約65.6MWhの電力供給が期待できるゆえ、年間の電力使用量が約42.8MWhに軽減され、約89.1トンの二酸化炭素が削減できる¹⁰⁾。汚泥処理量については、これまで約342.3トン処理してきたものが(平成18年度調べ)、メタン発酵処理により約159.7トンに軽減される。その差、約182.6トンを850°Cでの無害化燃焼処理する場合、含水率80%として、約58.0トンの二酸化炭素が発生するが¹¹⁾、この分が削減できる。ガスエンジンで発生する熱量のうち、工場内に還元できる量が約2,257MJ/日であるから(図10)、この分の約28.6トンの二酸化炭素が削減されることになる。よって本システムが稼働すれば年間約

表3 二酸化炭素の排出削減量

	設置前	設置後	削減量	二酸化炭素削減量
排水処理施設 使用電力	232.3[MWh]	42.8[MWh]	189.6[MWh]	89.1[トン]
排水処理量 (余剰汚泥量)	342.3[トン]	159.7[トン]	182.6[トン]	58.0[トン]
熱	0.0[MJ]	-2,257[MJ]*	2,257[MJ]	28.6[トン]
合計				175.7[トン]

* マイナス値はガスエンジンにより新たにエネルギーが発生したことを意味する。

175.7トンの二酸化炭素排出量が削減できる。1章で述べたように全国で約18万トンの果実缶詰が輸入されていることから、シロップ廃液は全国で約72,000トン/年発生することになり、もし本システムが全国展開できれば、約20,235トン/年の二酸化炭素排出削減量が期待できることになる。

7. まとめ

山梨罐詰の缶詰工場を舞台に、同工場から排出されるシロップ廃液から、メタン発酵とガスエンジンを利用したエネルギー回収システムを考案し、実験を通してその可能性を検証し、さらに経済性や環境性について議論した。

シロップ廃液を原料としたメタン発酵実験では、有機物負荷量を約10g-TS/L/日を目安に制御すれば、約500mL/g-TS/日のバイオガスが発生することが確認でき、ベンチスケールでも実証できた。考案したコジェネレーションシステムは、エネルギーバランスの検証から、全エネルギー変換効率が約33%のシステムになることが分かった。本システムを建設するに当たって、国や自治体からの補助金を得なくても、10年間の償却で商用コストと見合うことが分かり、補助金を期待すればさらに高い経済性と事業性が見込めることが分かった。排水処理費の負担も約47%の軽減が期待できる他、本システムが本格稼働すれば、年間約175.7トンの二酸化炭素排出量が削減でき、環境性に非常に優れたシステムであることが分かった。

なお本研究の内容は、平成21年度環境省「地球温暖化対策技術開発事業」に採択され、同年度中に図8に示したシステムを山梨罐詰の工場内に建設し、翌平成22年度より本格稼働を予定している。

謝辞

本研究は、関東経済産業局「バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業」(H18) および静岡市産学交流センター「地域課題に係る産学共同研究委託事業」(H19)の助成を受けて実施した。ガスエンジンについての技術的なアドバイスを静岡ガス(株)より、法令調査や外部評価委員会の開催などのご支援を(株)静岡県環境資源協会より頂いた。静岡大学工学部の中崎清彦教授からは、学術的な見地から懇切なるご助言とご指導を頂いた。

引用文献

- 1) 社団法人日本缶詰協会：缶詰時報, Vol.85, No.3, pp.52-53 (2006).
- 2) 塚原建一郎、澤山茂樹：バイオマスからの気体燃料製造とそのエネルギー利用, エヌ・ティー・エス, pp.169-177 (2007).
- 3) 松本豊他：バイオマス高効率メタン発酵システムの開発 (第1報), -生ごみの高濃度メタン発酵とバイオガスの回収-, 静岡県静岡工業技術センター研究報告, 47, pp.104-106 (2002).
- 4) Y. Matsumoto et al.: Methane Fermentation and Energy Utilization from Food-Waste Materials, EXPO World Conference on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell & Exhibition in Hamamatsu (Japan), No.3019 (2005).
- 5) 松本豊他：バイオマス高効率メタン発酵システムの開発(第3報), 静岡県静岡工業技術センター研究報告, 51, pp.74-79 (2006).
- 6) 酒井奨他：メタン発酵からのエネルギー回収, 空気調和・衛生工学会誌, Vol.81, No.3, pp.35-41 (2007).
- 7) 酒井奨：小規模バイオガスプラントと天然ガス併用型燃料電池システム, いっとじゅっけん (関東経済産業局・(株)経済産業調査会共同編集), 52(6), pp.28-29 (2007).
- 8) 酒井奨他：小規模バイオガスプラントと天然ガス併用型燃料電池発電システムの開発 -メタン

発酵馴養試験-, 静岡県静岡工業技術センター
研究報告, 52, pp.78-79 (2007).

- 9) 増田直己他：食品工場における高濃度排水バイオガス発電システム, 化学工学会第73年会研究発表講演要旨集, p.847 (2008).
- 10) 経済産業省および環境省：平成19年度電気事業者別二酸化炭素排出係数に関する報道資料(官報) (2008.12.19).
- 11) 環境省および経済産業省：特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令(経済産業省、環境省令第3号) (2006.3).