

# 建物完結型バイオガスシステム“メタファーム”の油分処理能力向上に関する実証実験

## Development and On-site Verification Test for Improving Oil Treatment Performance with Biogas Generation System "Metafarm"

奈良 知幸 Tomoyuki Nara\*<sup>1</sup> 山崎 祐二 Yuuji Yamazaki\*<sup>2</sup> 川尻 聡 Satoshi Kawajiri\*<sup>3</sup>  
加藤 利崇 Toshitaka Kato\*<sup>4</sup> 丸子 愛 Ai Maruko\*<sup>5</sup> 岩本 宏 Hiroshi Iwamoto\*<sup>6</sup>

### 梗概

筆者らが開発し、大阪の大規模複合施設（あべのハルカス）に導入した建物完結バイオガスシステム“メタファーム”は、厨芥と厨房排水から回収した固形分をメタン発酵法にて処理し、2013年の導入後から現在まで、安定運転を達成している。安定運転を達成するためには、厨房排水中から過剰な油分を除去することが必要であり、今後の改善課題として、高い処理コストをかけて処理している除去油分をメタファームで処理可能とすることが挙げられる。そこで本論文では、油分の効率的な処理方法の確立を目的として、有機資材を添加し処理原料中の油分比を調整するという着眼点で解決を試み、メタン発酵槽400L規模の実証試験を実施し、安定運転し得る条件を見出したのでこれを報告する。

キーワード：厨房排水，厨芥，メタン発酵

### Summary

We developed the on-site biogas generation system “Metafarm” and implemented at large-scale commercial building (Abeno Harukas) in Osaka. The system treats the solid recovered from kitchen wastewater, and kitchen waste by anaerobic digestion. The stable operation has been continued from the introduction in 2013 to the present. To keep stable operation, the present system needs to remove oil by grease trap. One of the future issues is to make it possible to reduce the oil processing cost. In this research, to establish an efficient treatment method for the oil, we tried to solve it by adding organic materials and adjusting the oil ratio in the processing raw material. We report that stable operation was confirmed in a demonstration experiment using a 400L fermenter.

Keywords: kitchen drainage, food waste, anaerobic digestion

## 1 はじめに

外食産業にて発生する食品廃棄物の再生利用率は、政府目標50%に対し、2013年以降40%程度で頭打ちとなっている<sup>1-3)</sup>。食品廃棄物の再利用方法として、家畜の飼料や農作物の肥料への転換が多いが、外食産業の多い都市部において飼料と肥料の需要が小さいことが、外食産業で発生する食品廃棄物の再生利用が進まない一因として考えられる。一方で、都市部では、熱や電気などのエネルギー需要が大きいため、食品廃棄物などをメタン発酵処理により、バイオガスとして回収する方法には優位性がある。しかし、建物から発生する有機性廃棄物をメタン発酵処理する場合、消化液渣の追加処理が必要となること、また、既往の屋外でのメタン発酵装置と比べ、装置規模が小さくなり、採算性が課題となることから、建物施設としてのバイオガスシステムの導入は進んでいない状況にある。上記の課題に対して筆者らは、メタン発酵と厨房除害設備を組み合わせることで消化液処理を安定的に行いながら、

\*1 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute

\*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

\*3 技術研究所 首席研究員 博士（工学） Senior chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

\*4 環境エンジニアリング本部 Environmental Engineering Department.

\*5 環境エンジニアリング本部 副部長 博士（工学） Senior Manager, Environmental Engineering Department, Dr. Eng.

\*6 環境エンジニアリング本部 環境共生・土壌環境ソリューショングループ グループ長 Group Leader, Environmental Engineering Department

消化液処理に必要なコストを低減する建物完結型バイオガスシステム「メタファーム」を開発し<sup>4)</sup>、2013年に厨芥処理量3t/日規模でも経済性を確保したシステムの実適用を開始した (Photo 1)。その後、より小さい規模でも機能性と経済性を両立し得るシステムの検討を重ね、現在では適用下限条件として厨芥発生量1t/日での成立性を確認し、大型ショッピングセンター、複合施設等への導入を進めている。実用化システムでは、バイオガスシステム内にもグリーストラップを設置し、厨房排水から油分を除去して、メタン発酵原料中の油分比を一定以下に維持することで、油分による発酵阻害を回避している (Fig. 1)。現在はグリーストラップで分離した油分 (以下、油状残渣) を場外搬出・場外処分しているが、油状残渣を除去せずにメタン発酵することができればメタンガス発生量の増加と油分の場外処分費の削減が可能となり、経済性の向上が期待できる。



Photo 1 稼働中の商用化バイオガスシステム  
 Commercialized biogas system

本稿では、適切な有機資材を添加し、原料中の油分比を制御することで、これまで廃棄せざるを得なかった油状残渣を全量処理可能なバイオガスシステムを考案し、400Lのメタン発酵槽を持つ試験装置で性能の検証を行った。

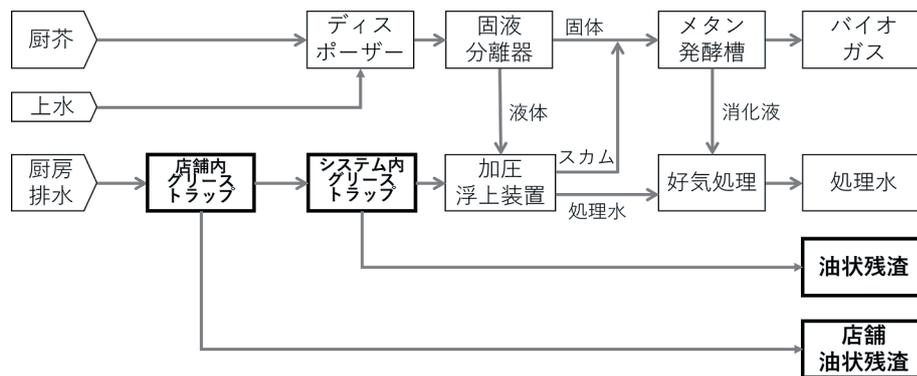


Fig. 1 商用化バイオガスシステムのフロー図  
 Flow diagram of commercialization biogas system

## 2 油分処理能力向上に関する実証試験

### 2.1 処理可能な油分比と有機物負荷の上限の把握<sup>5)</sup>

メタン発酵の安定運転条件の主要項目として油分比および有機物負荷の上限を把握する実験を行った。なお油分比は有機物量に対する油分量の比率とし、有機物量の指標としてVolatile Solid (以下、VS) を、油分量の指標としてn-Hexane抽出物質濃度 (以下、n-Hex) を用いることとした。試験条件を、Table 1に示す。試験は400L発酵槽を持つメタン発酵試験装置を用いて行い、発酵原料には既設の商業施設内メタン発酵設備の原料槽から採取した試料 (厨芥と厨房排水に由来する有機物試料)、油状残渣および水道水を混合して各試験条件となるよう調製した。Test

Table 1 油分比と有機物負荷の上限把握試験の条件  
 Conditions for the upper limit confirmation test of oil ratio and organic matter load

		発酵槽温度	HRT	有機物負荷	n-Hex/VS
		(°C)	(day)	(kg-VS/m <sup>3</sup> /day)	(-)
Test 1	Period 1	55	25	2	0.30~0.40
	Period 2				0.40~0.50
Test 2	Period 3	55	25	2	0.25~0.30
	Period 4		16	3	
	Period 5		12.5	5.5	
	Period 6		16	4	

1ではメタン発酵を安定運転可能な油分比の上限を、Test 2ではメタン発酵を安定運転可能なVS容積負荷の上限を確認した。なお、既往研究より「模擬生ごみの高温メタン発酵においてVS分解率が76~78%<sup>6)</sup>、揮発性脂肪酸濃度(以下、VFA濃度)は4,000mg/Lを超えるとグルコースのメタン発酵を阻害する<sup>7)</sup>」ことから、本試験における安定運転の目安として、メタンガスの発生量が安定していることに加えて、VS分解率が75%以上、VFA濃度3,000mg/L以下を用いることとした。

試験結果をFig. 2に示す。Period 1の条件ではメタンガス発生量 (methane production rate) が安定しており、VSの平均分解率 (VS Removal rateの平均値) が78.1%、VFA濃度 (VFA Conc.) が1,000mg/L以下であったことから、安定運転が可能と判断した。またn-Hexの平均分解率 (n-Hex Removal reteの平均値) が97.3%となりVSの平均分解率よりも高い値となっており、油分は他の有機物よりも分解が進んでいることが示唆された。一方で、Period 2ではメタンガス発生量とVS分解率の低下に加えて、VFA濃度が3,000mg/Lを超えたことから、メタン発酵が阻害されており、安定運転の継続が困難であった。Period 3とPeriod 4の条件ではメタンガス発生は継続し、VSの平均分解率が75%以上、VFAの蓄積も見られず安定運転が可能であった。しかし、Period 5の条件では試験期間終盤においてメタンガス生成量が低下し、VFA濃度が3,000mg/L付近まで上昇したことから、安定運転の継続は困難であると判断した。Period 5から有機物負荷を低下させたPeriod 6ではVFAの蓄積が解消した。

以上より、油状残渣を混合した原料をメタン発酵する場合、油分比 (n-Hex/VS) を0.3~0.4以下、有機物負荷を3.0~4.0kg-VS/m<sup>3</sup>/day以下とすることで、メタン発酵の安定運転を継続できる可能性が示された。

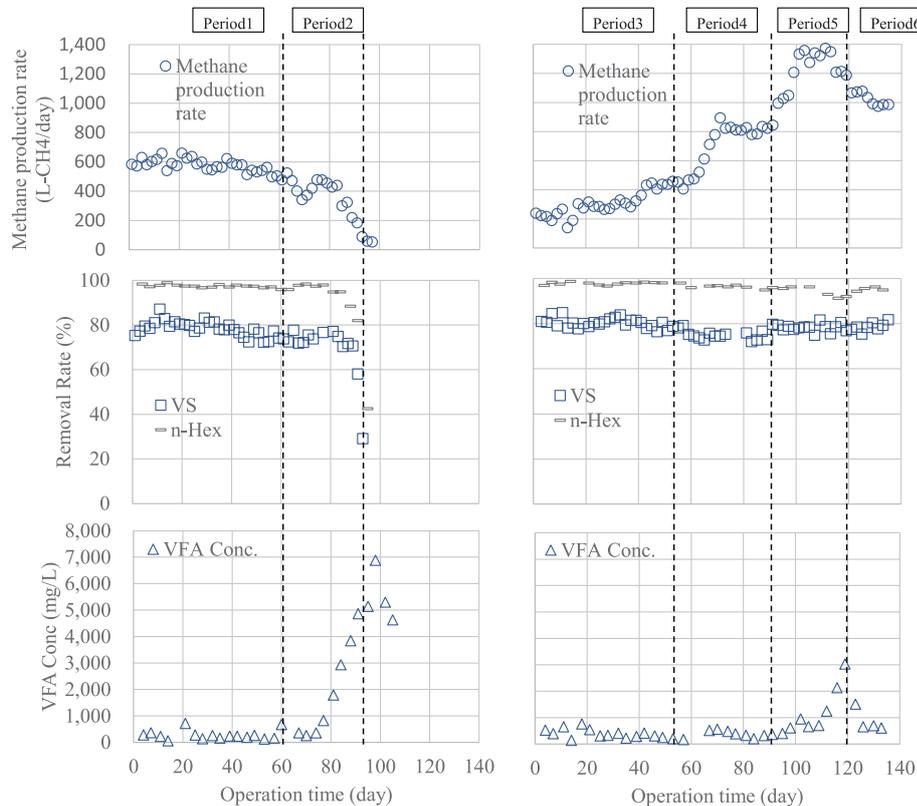


Fig.2 油分比と有機物負荷の上限確認試験の結果  
 Results of upper limit confirmation test of oil ratio and organic matter load

## 2.2 有機資材の選定

メタン発酵原料の油分比を調整するために使用する有機資材を調査した。国内で調達可能であり、炭水化物等が主体で油分が少ない有機資材として8種類(厨芥・パン粉屑・豆腐粕およびそれらを原料とするエコフィード(以下、厨芥乾燥物)、古米、段ボール、海藻、廃糖蜜、廃糖液、廃砂糖、廃スターチ)を選定した。さらに、①年間を通して安定的に調達できること、②食用と競合しない原料(例えば廃棄物由来)であること、③常温で長期間保存できること、④調達コストが安価であること、⑤有効利用が進んでいないことの観点で評価し、候補として厨芥乾燥物、段ボール、廃糖液、廃スターチの4種類に絞り込んだ。それぞれの特徴をTable 2に示す。選定した4種類の有機資材の油分調整効果を把握するために、各有機資材と油状残渣を混合した原料を用いたメタンバッチ発酵試験を行った。

試験は3.5L発酵槽を持つメタン発酵試験装置に実用化したメタン発酵設備より採取した発酵槽汚泥を種汚泥として、VS容積負荷5.0kg-VS/m<sup>3</sup>、n-Hex/VS=0.2に調製した油状残渣と各有機資材の混合原料を添加し、10Lのメタン発酵槽を用いて、発酵温度55℃、試験期間28日の条件でバッチ試験を実施した。また有機資材による油分調整の効果を検証するために油状残渣のみを原料とする系（VS容積負荷5.0kg-VS/m<sup>3</sup>、n-Hex/VS=0.76）について、10Lのメタン発酵槽を用いて、発酵温度55℃、試験期間28日の条件でバッチ試験を実施した。

試験結果をTable 3に示す。油状残渣単独投入VS当たりのメタンガス発生量は少なく、高油分比によるメタン生成の阻害が生じた。一方、厨芥乾燥物、廃スターチ、廃糖液の混合原料ではメタンガス発生量が増加し、n-Hex分解率も油状残渣単独と同等もしくは高い値となり、厨芥乾燥物、廃スターチ、廃糖液は油分調整用の有機資材として利用できる可能性が示唆された。一方で、段ボールの混合原料では油状残渣単独と比較して、メタンガス発生量は同程度、n-Hex分解率は低下する結果となり、油分調整用の有機資材として適さないことがわかった。

Table 2 選定した有機資材の特徴  
Characteristics of selected organic materials

	厨芥乾燥物	段ボール	廃スターチ	廃糖液
年間を通した安定調達	年間変動なし ◎	年間変動なし ◎	調達量が限定的 ○	年間変動なし ◎
食料との競合	競合なし ◎	競合なし ◎	競合なし ◎	競合なし ◎
常温長期保管	常温長期保管可能 ◎	常温長期保管可能 ◎	常温長期保管可能 ◎	腐敗の可能性 △
調達コスト	飼料と競合のため、 調達コスト高 △	安価に調達可能 ◎	加工が不要なので比 較的安価 ○	水分が多く有機物当 たりのコストが割高 △
有効活用	飼料と競合 △	リサイクルが成立 △	中小規模は未利用 ○	低濃度により未利用 ○

Table 3 有機資材と油状残渣の混合メタン発酵試験の結果  
Results of mixed methane fermentation test of organic materials and oily residue

	油状残渣 単独	厨芥 乾燥物	段ボール	廃スターチ	廃糖液
投入VS当たり メタンガス発生量 (Nml/g-VS)	120	554	161	419	360
n-Hex 分解率 (%)	78	78	31	86	76

### 2.3 有機資材を添加した調整原料処理の安定性確認試験

有機資材によって油分比を調整した原料でのメタン発酵の安定運転を確認するために、400L発酵槽のメタン発酵試験装置にて安定性確認試験を実施した。有機資材には年間を通じて安定的に調達できることから厨芥乾燥物と廃糖液を選定し、発酵原料には既設の商業施設内メタン発酵設備の原料槽から採取した試料と油状残渣を発生量ベースで混合し、有機資材および水道水を混合して各試験条件（Table 4）に調製した。また有機資材による油分調整効果を検証するため、商業施設内メタン発酵設備の原料槽から採取した試料と油状残渣と水道水のみで油分比を調整した原料についても連続メタン発酵試験を実施した。連続試験で使用した厨芥乾燥物と廃糖液物性をTable 5に示す。廃糖液はVS濃度に対して、CODcr濃度が高いため、VS投入量を基準とすると過負荷となる危険性があるため容積負荷はCODcr基準とし、油分比はn-Hex/VSではなく、n-Hex/CODcrを用いた。容積負荷と油分比は厨芥乾燥物を用いた連続試験の値を参考に決定した。本試験における安定運転の目安は、「2.1 処理可能な油分比と有機物負荷の上限の把握」と同様にメタンガスの発生量が安定していることに加えて、VS分解率が75%以上、VFA濃度3,000mg/L以下を用いることとした。

試験結果をFig. 3に示す。Period 1、Period 2、Period 3のいずれの条件においても、投入CODcr1kg当たりのメタンガス収率（Methane Yield）は210~240m<sup>3</sup>程度で安定していたが、Period 2、Period 3ではVS分解率がそれぞれ71%、74%となり、安定運転の目安とした75%を若干下回った。ただし、Period 1、Period 2、Period 3のいずれの条件においても、VFA蓄積は見られず、メタンガス生成も安定していることから安定運転が達成されたと判断した。この結果から厨芥乾燥物もしくは廃糖液を添加して油分比を制御することで、油状残渣を場外搬出せずに全量メタン発酵処理できる可能性が示された。

Table 4 有機資材を混合した調整原料の連続メタン発酵試験条件  
 Conditions for continuous methane fermentation test of raw materials adjusted with organic materials

	発酵槽温度 (°C)	HRT (日)	有機物負荷		油分比		副資材 (-)
			VS基準 (kg-VS/m <sup>3</sup> /day)	CODcr基準 (kg-CODcr/m <sup>3</sup> /day)	n-Hex/VS (-)	n-Hex/CODcr (-)	
Period1	55	20	3.5	9.0	0.30	0.11	-
Period2			3.5	8.0	0.30	0.12	厨芥乾燥物
Period3			-	8.0	-	0.12	廃糖液

Table 5 有機資材の物性  
 Properties of organic materials

	CODcr (mg/kg)	VS (mg/kg)	n-Hex ソックスレー抽出 (mg/kg)	n-Hex 振盪法 (mg/kg)
厨芥乾燥物	642,000	871,000	56,900	-
廃糖液	160,000	94,300	-	19

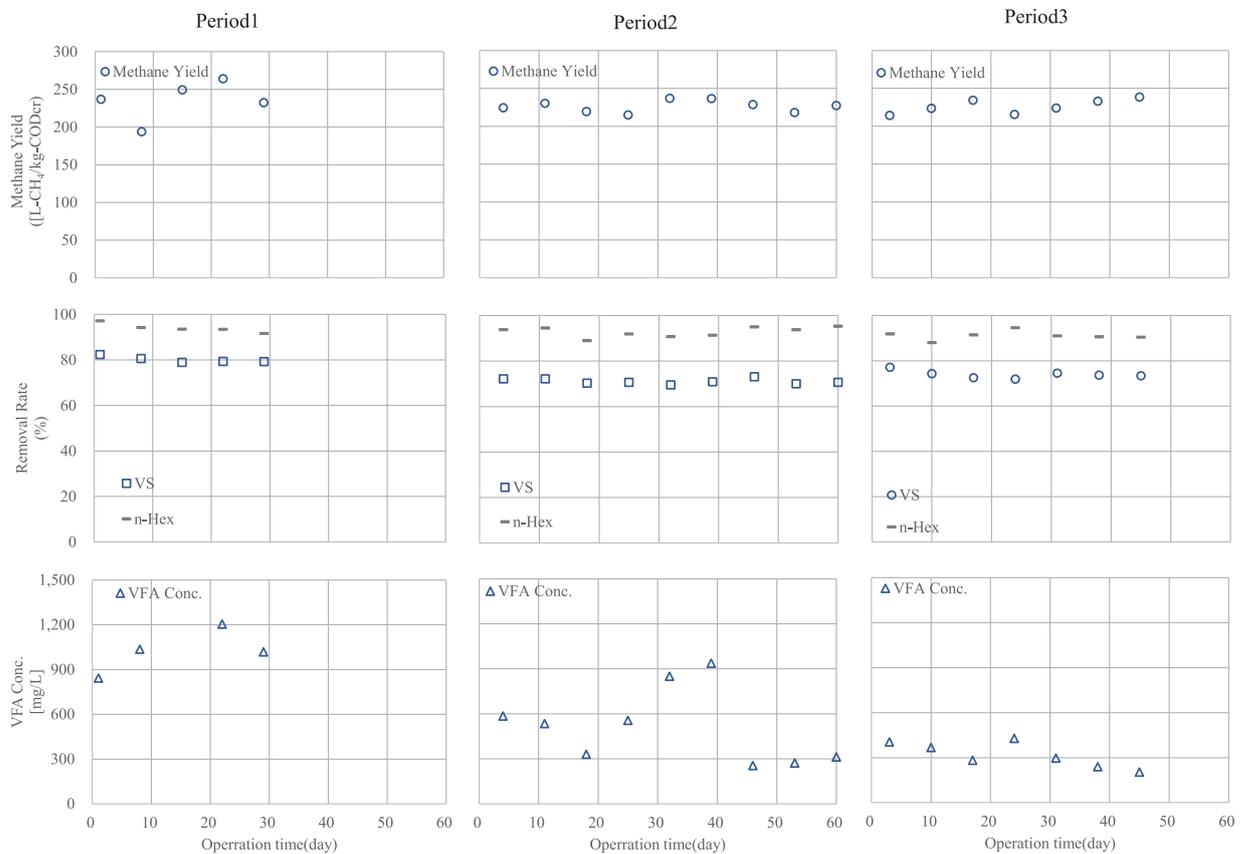


Fig. 3 有機資材を混合した調整原料の連続メタン発酵試験結果  
 Results of continuous methane fermentation test of raw materials adjusted with organic materials

### 3 システムの評価

#### 3.1 処理水中n-Hex濃度の検証

厨房排水から油分を分離するには、各店舗に設置しているグリーストラップにて油状残渣を回収する方法とバイオガスシステム内の加圧浮上槽で浮上分離する方法がある (Fig. 4)。グリーストラップからの油状残渣回収は手作業であり、性能を維持するためには定期的な清掃も必要となるため、管理に多くの労力を必要としており、バイオガスシステムの管理を省力化するためにはグリーストラップを用いないことが望ましい。一方で、グリーストラップを用いない場合、厨房排水から回収できる油分が減少し、後段の好気処理への油分流入量が増加することで、好

気処理後でもn-Hex濃度を下水放流基準以下に低減できないことが懸念される。そこで、安定性確認試験の結果と実用システムの稼働データをもとにTable 6に示す条件を用いてマテリアルバランスを計算し、店舗側にグリーストラップを設置した場合と店舗側とバイオガスシステム内のいずれにもグリーストラップを設置しない場合で、メタン発酵原料の油分比を0.3とするために必要な有機資材の使用量、メタンガスの生成量と好気処理後に下水放流可能なn-Hex濃度30mg/Lを達成可能な厨房排水中のn-Hex濃度上限を検証した。なおVS濃度はn-Hex濃度に350mg/Lを加えた値とし、有機資材としては厨芥乾燥物を用いることとした。

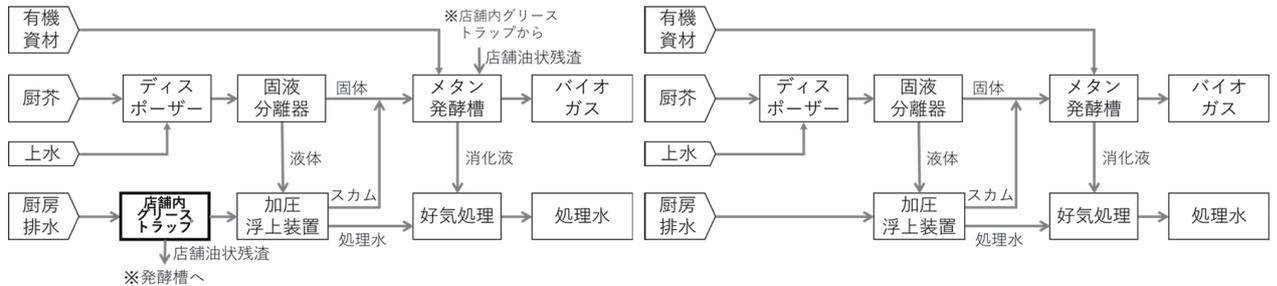


Fig. 4 マテリアルバランス試算に使用したシステムフロー図  
System diagram for material balance Calculation

Table 6 マテリアルバランス試算の条件  
Calculation condition for material balance

試算条件							
排出量			固形分離器回収率			VS分解率	
厨芥	kg/日	900	VS	%	65	副資材あり	%
厨房排水	m <sup>3</sup> /日	300	n-Hex	%	55	副資材なし	%
VS濃度			グリーストラップ回収率			n-Hex分解率	
厨芥	g/L	180	VS	%	35	副資材あり	%
副資材	g/L	871	n-Hex	%	43	副資材なし	%
n-Hex濃度			加圧浮上回収率			分解VS当たりのメタン生成量	
厨芥	g/L	15	VS	%	46	非油分	L/kg-分解VS
副資材	g/L	57	n-Hex	%	71	油分	L/kg-分解VS
							600
							1,350

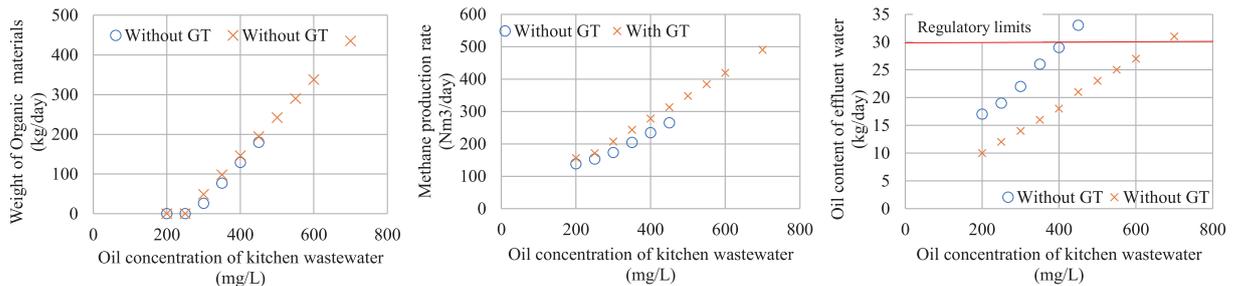


Fig. 5 試算結果  
Calculation results

試算の結果をFig. 5に示す。図中ではグリーストラップを設置しない場合を「Without GT」、店舗側にグリーストラップを設置する場合を「With GT」と記載した。店舗側のグリーストラップの有無にかかわらず、厨房排水中のn-Hex濃度が300mg/L以上の場合には有機資材を添加する必要がある、店舗側にグリーストラップを設置した方が回収される油分が多いため、有機資材の使用量が多くなり、メタンガス生成量も多くなることが確認された。また好気処理後のn-Hex濃度を下水道排除基準の30mg/L以下を満足する厨房排水中のn-Hex濃度の上限值は、店舗側にグリーストラップを設置しない場合では400mg/L、店舗側にグリーストラップを設置した場合には600mg/Lであった。

### 3.2 運営コストの比較

店舗側へのグリーストラップの設置によってシステムの運営コストの面にはメタンガスの生成量増加はプラスの

Table 7 運営コストの試算条件  
Calculation conditions for operating costs

試算条件		
単価		
有機資材	円/kg	40
回収メタン	円/Nm <sup>3</sup>	50
維持管理費		
GT清掃費	円/日	3,000
配管洗浄費	円/年	600,000

影響を、有機資材の使用量増加とグリーストラップの維持管理費はマイナスの影響を与えられられる。

そこでTable 7に示す条件で運営コストを算出し、厨房排水中のn-Hex濃度は300mg/L、350mg/L、400mg/Lの3ケースについて店舗側にグリーストラップを設置すべきか検証した。

運営コストの試算結果をFig. 6に示す。厨房排水中のn-Hex濃度が300mg/Lと350mg/Lではグリーストラップなしにメリットがあり、厨房排水中のn-Hex濃度が400mg/Lではグリーストラップを設置した方が有利となった。厨房排水中の油分を場外搬出することなく場内で処理する場合には厨房排水中のn-Hex濃度を想定して、グリーストラップの有無を検討する必要があることが示唆された。

ただし、建設省告示第千五百九十七号（改正 平成二二年三月二九日国土交通省告示第二四三号）において、配管設備の機能維持のためにグリーストラップの設置が定められているため、店舗グリーストラップを使用しない場合には行政との協議が必要となることには留意する必要がある。

#### 4 まとめ

メタファームの運用の大きな課題の一つである厨房排水中の油分受入れ可能量の制限に着目して、有機資材を添加することで受入れ可能な原料中の油分比を高めた条件でのバイオガスシステムの運転安定性について検証を行った。調達可能性とバッチ試験によって厨芥乾燥物と廃糖液を有機資材として選定し、n-Hex/VS=0.3、VS容積負荷3.5kg-VS/m<sup>3</sup>/日の運転条件において、厨芥乾燥物と廃糖液で油分比を調整した原料での安定運転を確認した。

また安定運転試験の結果とこれまでの商用システムの稼働データをもとにグリーストラップの有無が好気処理後のn-Hex濃度に与える影響と運営コストに与える影響を評価し、厨房排水中のn-Hex濃度によってはグリーストラップを設置しない方が有利となる可能性があることを示した。

#### 謝辞

本研究は環境省「CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の委託を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 農林水産省、平成30年度食品リサイクル法に基づく定期報告の取りまとめ結果の概要、2019
- 2) 農林水産省、平成28年度食品リサイクル法に基づく定期報告の取りまとめ結果の概要、2017
- 3) 農林水産省、平成26年度食品リサイクル法に基づく定期報告の取りまとめ結果の概要、2015
- 4) T. Kato, M. Inoue, Y. Yamazaki, F. Iba and N. Shiota：空気調和・衛生工学会大会、平成27年度大会（大阪）学術講演論文集 第10巻 都市・環境編, E-3, 2015
- 5) 山崎祐二、奈良知幸、川尻聡、加藤利崇：建物運用時に発生する高油分有機性廃棄物のメタン発酵技術の開発、第54回日本水環境学会年会要旨集, p.106, 2020
- 6) 佐々木宏、李玉友、関廣二、上垣内郁夫：生ごみの高温・高濃度メタン発酵に及ぼす滞留時間と負荷の影響、水環境学会誌、第22巻、第12号、pp.983-989、1999
- 7) I. Siegert and C. Banks：the effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors, Process Biochemistry, 40, pp.3412-3418, 2005

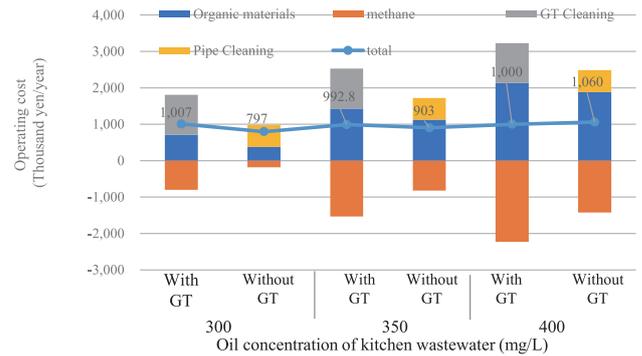


Fig. 6 運営コストの試算結果  
Calculation result of operating costs