

# 乾式メタン発酵ポテンシャル試験報告書

# 目次

1	要約	2
2	はじめに	2
3	試験概要	2
	3.1 試験の目的	2
	3.2 試験の概要	2
4	試験内容	3
	4.1 使用するサンプル	3
	4.2 想定投入原料	4
	a) 前提条件	4
	b) 混合割合	5
	4.3 種汚泥	6
	4.4 試験条件	6
5	試験結果	7
	5.1 バイオガス	7
	5.2 ガス組成および単位投入量当たりのバイオガス発生量	8
	5.3 VS 分解率	9
	5.4 炭素分解率	10
	5.5 高負荷試験 (case-3、case-4)	10
6	本試験のまとめ	13
7	今後の課題	14

## 1 要約

株式会社沖縄クリーン工業様より頂いたメタン発酵試験サンプルに対し、一定の割合で混合した想定投入原料を調整してメタン発酵ポテンシャル試験のケーススタディー（case-1～5）を実施した。結果としては各試験区においてメタン発酵が確認されたこと、加えてオガコに対するグリストラップの割合が比較的高い case-3、4 において他の試験区より比較的多いバイオガス発生量および VS 分解率等を確認することができた。

一方、原料の特性として、オガコが VS 分解率等に影響を与えていること、グリストラップがメタン発酵を活性化するために必要な基質を補填している可能性があることなどが示唆された。投入原料の割合を再度想定する上ではオガコにおける含水率調整はある程度必要とした上で、後段の堆肥化などを視野に入れながら、ペーパースラッジを利用する等、オガコの割合を調整する必要があると思われる。

実機検討を進めるにあたっては槽内の挙動やメタン発酵に与える影響を確認するためにも連続試験が必要になると考える。

## 2 はじめに

株式会社沖縄クリーン工業様（以下、貴社とする）より頂いた各サンプルについて、一定の割合に調整しケーススタディーを実施することでメタン発酵が可能かどうかを明らかにすることを目的に乾式メタン発酵ポテンシャル試験を実施した。得られた試験結果を以下に報告する。

## 3 試験概要

### 3.1 試験の目的

貴社より頂いた各サンプル（オガコ、グリストラップ、豚のふん尿、し尿、ペーパースラッジ）を一定の割合で混合した case-1～5 の想定投入原料を調整した。これに対し、乾式メタン発酵法を用いたメタン発酵ポテンシャル試験（以下、本試験とする）を実施することで、原料が持つメタン発酵のポテンシャルを評価し、メタン発酵可能か確認することを目的とする。

### 3.2 試験の概要

本試験は乾式メタン発酵法を用いたリアクター型バッチ式メタン発酵ポテンシャル試験である。図 1 に示すようにリアクター内に種汚泥と原料となるサンプルを混合し封入した後、恒温器内で発酵させることでバイオガスの発生量等を確認する試験である。封入時はヘッドスペースを窒素パージすることで嫌気条件にし、所定の温度にて無攪拌で発酵を促進する。発生したバイオガスは流量を測定した後ガスバッグで捕集しガスクロマトグラフィーにてガス濃度を分析する。また、発酵前後の各種分析を合わせてメタン発酵の特性を評価する試験である。

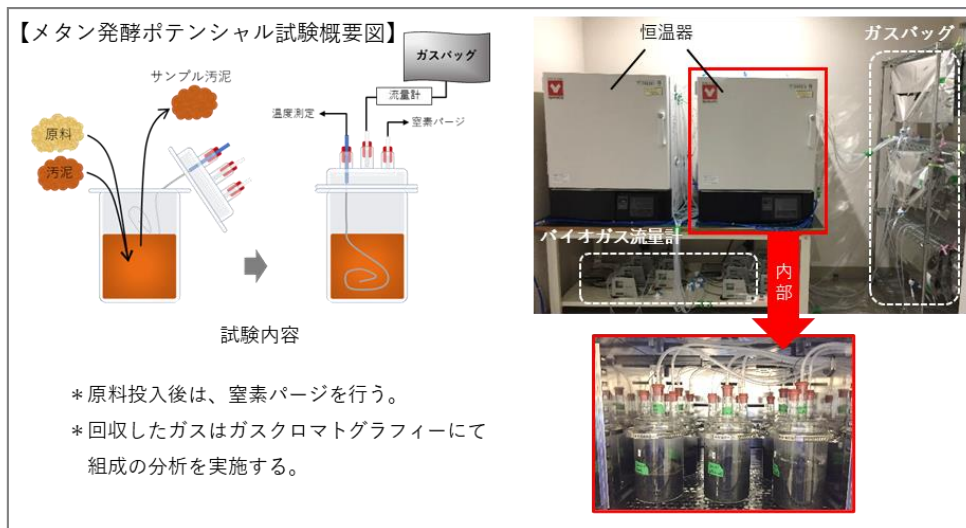


図1 メタン発酵ポテンシャル試験概要図

#### 4 試験内容

##### 4.1 使用するサンプル

本試験では貴社から頂いた各サンプルについて、発酵前原料の性状を確認するために性状分析を実施した。分析結果を表1、2に示す。

表1 使用するサンプルの性状等について（オガコ、ペーパースラッジ）

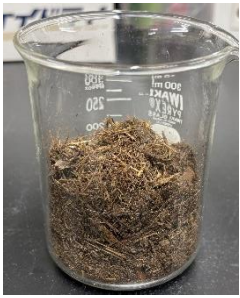




		オガコ	ペーパースラッジ
外観			
水素イオン濃度 (pH)	(-)	7.94	8.37
含水率	(wt%)	44.15	48.14
灰分	(wt%)	9.32	32.31
全固形物量 (TS)	(wt%)	55.85	51.86
強熱減量 (VS)	(wt%)	46.53	19.55
アンモニア態窒素	(mg/kg)	0	0
ケルダール態窒素	(mg/kg)	3,789	1,458
全炭素重量	(mg/kg)	193,418	113,317

表2 使用するサンプルの性状等について（グリストラップ、豚のふん尿、し尿）

	グリストラップ	豚のふん尿	し尿
外観			
水素イオン濃度 (pH)	(-) 4.20	8.10	8.09
含水率 (wt%)	80.59	99.42	99.88
灰分 (wt%)	0.50	0.23	0.06
全固形物量 (TS) (wt%)	19.41	0.58	0.12
強熱減量 (VS) (wt%)	18.91	0.35	0.06
アンモニア態窒素 (mg/kg)	130	0	616
ケルダール態窒素 (mg/kg)	427	885	751
全炭素重量 (mg/kg)	59,444	1,840	760

## 4.2 想定投入原料

### a) 前提条件

本試験ではサンプルが複数種あり、サンプルごとに排出や取り扱いなどの子細が異なるため、単一原料でのポテンシャル試験ではなく、想定される一定割合で混合された原料（想定投入原料）を調整し、試験に用いた。

割合については事前にヒアリングした内容を基に、サンプルごとの性状、取引価格や取扱量などを考慮して case-1～case-5 までを作製した（表3）。

表3 想定投入原料調整用年間取扱量および取引価格

	オガコ	グリストラップ	豚のふん尿	し尿	ペーパー・スラッジ	合計
取引価格 <sup>※1</sup>	-4,000	30,000	0	14,000	6,000	
case-1 <sup>※2</sup>	1,680	300	1,000	1,600	3,600	8,180
case-2	1,500	300	1,000	1,600	100	4,500
case-3	1,100	300	1,000	1,600	0	4,000
case-4	500	300	1,000	1,600	100	3,500
case-5	900	0	400	1,600	600	3,500

※1：取引価格のみ（円/ ton）、残りの単位は（ton/年）

※2：case-1 が頂いた情報を基にした数量で、case-2 から case-5 は case-1 を基に調整したケーススタディーとなる

b) 混合割合

表3の年間取扱量を基に各想定投入原料における混合割合を表4に示した。混合量はこの混合割合からVS投入量が7.0 g-VS/Lになるように（高負荷試験では14.0 g-VS/Lになるように）混合し調整した。作製した5つのケーススタディーに原料を投入しない blank と合わせて6検体について本試験を実施した。各原料における想定される性状を表5に示す。

特徴としては、case-1を基として、case-2はオガコが多く、case-3はオガコに対するグリストラップの割合が比較的高い。Case-4はcase-3に対してさらにオガコ、ペーパースラッジを減らした分、含水率が高い。Case-5はグリストラップが一切入っていないとなっている。

この5つのケースを基に原料のもつメタン発酵ポテンシャルを確認する。

表4 各想定投入原料の混合割合

	case-1	case-2	case-3	case-4	case-5
オガコ	20.5	33.3	27.5	14.3	25.7
グリストラップ	3.7	6.7	7.5	8.6	0.0
豚のふん尿	12.2	22.2	25.0	28.6	11.4
し尿	19.6	35.6	40.0	45.7	45.7
ペーパースラッジ	44.0	2.2	0.0	2.9	17.1

※単位：wt%

表5 各投入原料の想定される性状

	case-1	case-2	case-3	case-4	case-5
水素イオン濃度 (-)	64.90	78.77	82.99	88.66	76.63
含水率 (wt%)	16.19	3.93	2.68	2.39	7.99
灰分 (wt%)	35.10	21.23	17.01	11.34	23.37
全固形物量 (TS) (wt%)	18.91	17.30	14.33	8.95	15.38
強熱減量 (VS) (wt%)	756.64	1,218.96	1,177.93	1,022.01	597.31
アンモニア態窒素 (mg/kg)	125.20	227.59	256.04	292.62	281.52
ケルダール態窒素 (mg/kg)	1,690.67	1,787.59	1,595.66	1,215.69	1,668.63
全炭素重量 (mg/kg)	92,148.33	71632.98	58,412.33	36,837.13	69,719.57

#### 4.3 種汚泥

本試験で使用する種汚泥は株式会社富士クリーン乾式メタン発酵施設で採取した発酵残渣を使用した。採取時の性状等については表 6 に示す。

表 6 使用する種汚泥の性状について

		種汚泥
外観		
水素イオン濃度 (pH)	(-)	8.30
比重	(g/mL)	0.966
含水率	(wt%)	86.16
灰分	(wt%)	6.43
夾雑率	(wt%)	4.92
全固形物量 (TS)	(wt%)	13.84
強熱減量 (VS)	(wt%)	7.42
揮発性脂肪酸 (VFA)	(mg/kg)	1,201.00
アンモニア態窒素	(mg/kg)	3,149.00
ケルダール態窒素	(mg/kg)	5,542.00
全炭素重量	(mg/kg)	38,556.72

#### 4.4 試験条件

本試験は以下の条件に沿って実施した。

- ・ 試験数 : blank、Case-1、Case-2、Case-3、Case-4、Case-5
- ・ 種汚泥量 : 1,000 mL
- ・ 原料量 : 7.0 g-VS/L に調整 (高負荷試験では 14.0 g-VS/L)
- ・ 発酵温度 : 54°C
- ・ 発酵期間 : 168 時間



図2 メタン発酵ポテンシャル試験時の様子

## 5 試験結果

### 5.1 バイオガス

本試験で得られたバイオガスは図3の通りとなった。発酵期間を168時間としていたが、バイオガスの発生が認められなくなった96時間で試験を停止した。blank試験区で発生したバイオガスに対して case-2 を除き各原料試験区でバイオガスの増加が確認された。特に case-3 および case-4 においては、およそ2倍のバイオガス発生量が認められた。

これらのことから、原料の分解によるバイオガスの発生が示唆された。各試験区のバイオガス発生量、分解日数等は表7に示す。

表7 各試験区の試験結果（バイオガス発生量等）

	blank	case-1	case-2	case-3	case-4	case-5
累積BG発生量 (NmL)	731.89	1,177.02	378.99	1,640.58	1,559.38	1,031.86
原料から発生した累積BG発生量 (NmL)	-	498.28	14.83	955.03	865.35	353.98
原料分解日数 (日)	-	3.5	2.0	4.0	2.5	3.5

※原料から発生した累積BG発生量はガス流量データを blank 補正後累積して求めた。

※BG=バイオガス

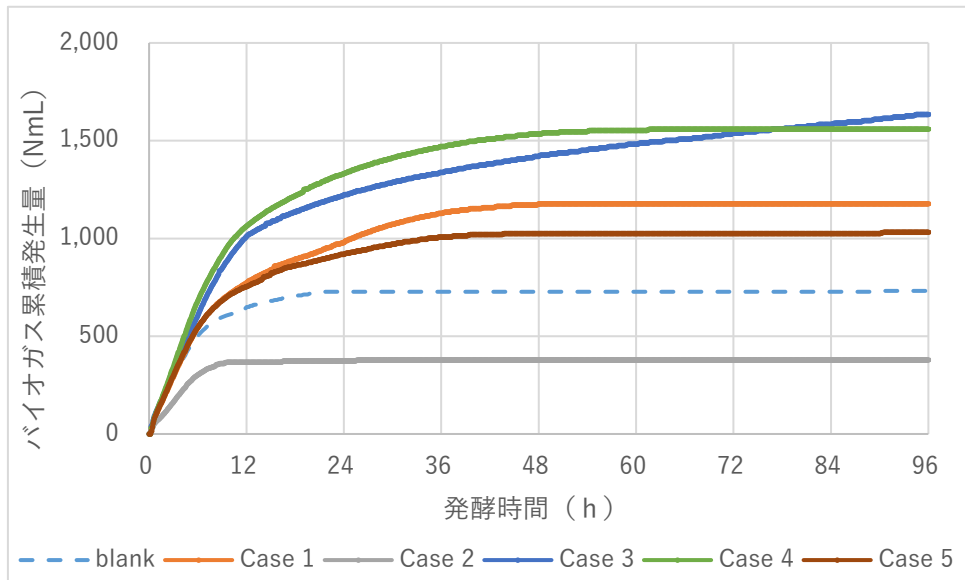


図3 各試験におけるバイオガスの累積発生量

## 5.2 ガス組成および単位投入量当たりのバイオガス発生量

本試験で得られたバイオガスをガスクロマトグラフィーで分析した結果、バイオガスの組成および原料から得られるバイオガス・メタンの発生量については表8の通りとなった。得られたガスの組成はメタンと二酸化炭素が想定範囲内（メタン 35~65%、二酸化炭素 65~45%）の濃度だったので、得られたガスはバイオガスであることが確認できた。

表8 各試験におけるバイオガスの組成

	blank	case-1	case-2	case-3	case-4	case-5
メタン濃度 (vol%)	47.60	48.37	48.68	47.60	53.68	44.73
二酸化炭素濃度 (vol%)	52.40	51.63	51.32	52.40	46.32	55.27
湿重量当たりの BG 発生量 <sup>※1</sup> (NmL/g-wet) <sup>※2</sup>	-	13.46	0.37	19.50	10.97	7.70
TS 当たりの BG 発生量 (NmL/g-TS)	-	38.35	1.72	114.68	96.74	32.93
VS 当たりの BG 発生量 <sup>※3</sup> (NmL/g-VS)	-	71.18	2.12	136.14	122.56	50.03
湿重量当たりの CH <sub>4</sub> 発生量 (NmL-CH <sub>4</sub> /g-wet)	-	6.51	0.18	9.28	5.89	3.44
TS 当たりの CH <sub>4</sub> 発生量 (NmL-CH <sub>4</sub> /g-TS)	-	18.55	0.84	54.59	51.93	14.73
VS 当たりの CH <sub>4</sub> 発生量 (NmL-CH <sub>4</sub> /g-VS)	-	34.43	1.03	64.80	65.79	22.38
分解 VS 当たりの CH <sub>4</sub> 発生量 <sup>※4</sup> (NmL-CH <sub>4</sub> /g-VS)	-	355.42	358.76	347.34	414.67	318.12

※1：BG=バイオガス

※2：NmL/g=Nm<sup>3</sup>/t

※3：(投入 VS 重量)=(使用した原料重量)×(原料の VS)で算出している。

※4：(分解 VS 重量)=(投入 VS 重量)÷(VS 分解率)

### 5.3 VS 分解率

原料中に含まれる有機物量 (VS) の分解率を発生したバイオガス量からメタン・二酸化炭素に分け、物質量ベースで算出した。結果は発酵後の VFA の濃度を併記し、図 4 に示した。

また、メタン発酵における中間体である揮発性脂肪酸 (VFA) についても種汚泥の値が 1,067.01 mg/kg に対し、各試験区とも 1,000 mg/kg を下回ったことから蓄積しておらず分解された VS は概ねバイオガスに変換することができた。

一方、case-2 においてはバイオガスの発生も少なく、原料の分解も進んでいないことから、酸生成にも至っていないと判断することができる。その中でも case-3、および case-4 は他の試験区と比較してもメタン発酵が優位に進んでいると考えることができる。

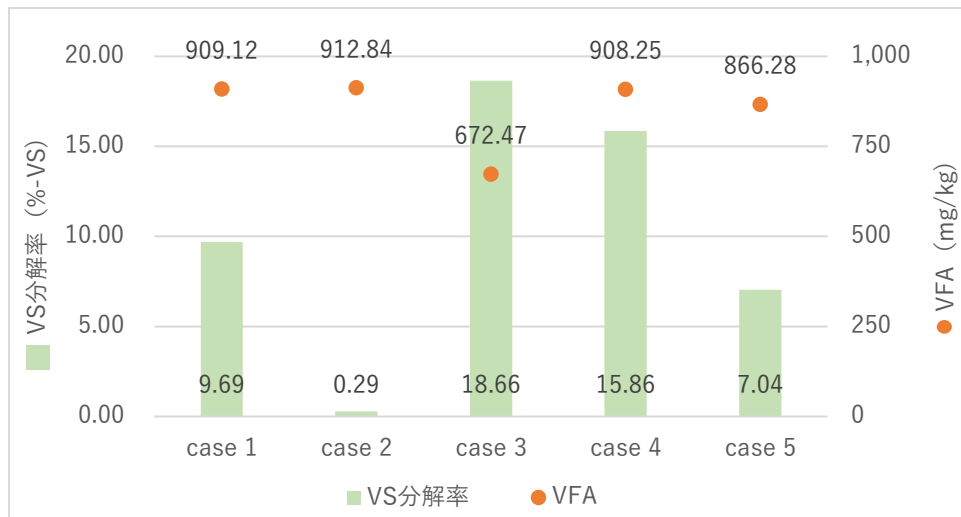


図 4 各原料区における原料の VS 分解率と VFA

#### VS 分解率の算出

- |                  |           |
|------------------|-----------|
| ・ VS             | : A (%)   |
| ・ 使用した原料重量       | : B (g)   |
| ・ 原料から発生したバイオガス量 | : C (NmL) |
| ・ メタンの濃度         | : D (%)   |
| ・ 二酸化炭素の濃度       | : E (%)   |

$$\text{原料重量中の VS 重量} = B \times (A \div 100) = F \text{ (g)}$$

$$\text{メタンの重量} = C \times (D \div 100) \div 22.4 \times 16.04 \div 1,000 = G \text{ (g)}$$

$$\text{二酸化炭素の濃度} = C \times (E \div 100) \div 22.4 \times 44.01 \div 1,000 = H \text{ (g)}$$

$$\text{■ VS 分解率} = (G + H) \div F \times 100 \text{ (\%-VS)}$$

## 5.4 炭素分解率

投入原料の炭素重量のうち、バイオガスになった炭素重量の割合を算出した結果、炭素分解率は図5の通りとなった。炭素分解率とVS分解率がほぼ同等の値となったことから分解されたVSのほとんどが炭素で構成されたもの（炭水化物など）であったことが示唆された。

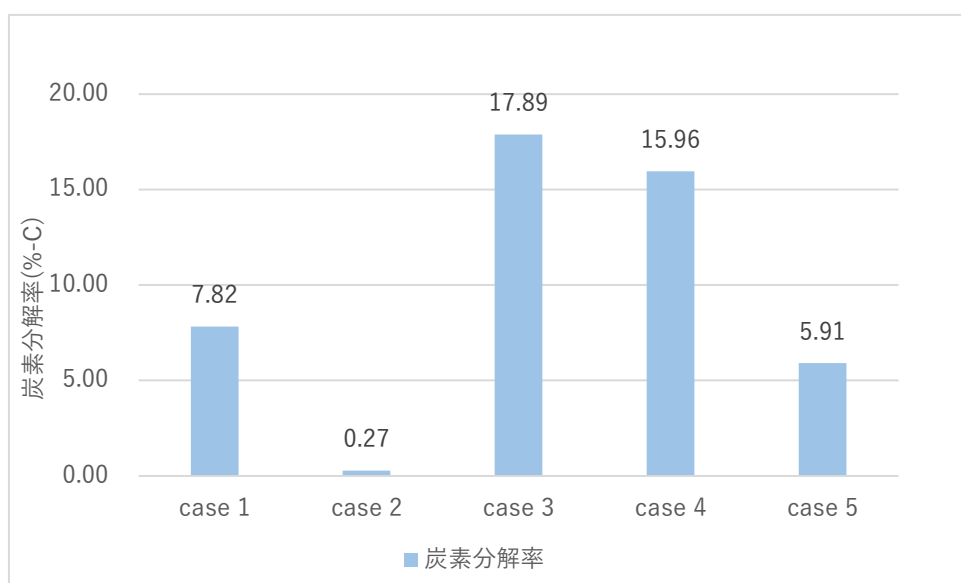


図5 各原料区における炭素分解率

### 炭素分解率の算出

・ 全炭素従量	: A (%)
・ 使用した原料重量	: B (g)
・ 原料から発生したバイオガス量	: C (NmL)
・ メタンの濃度	: D (%)
・ 二酸化炭素の濃度	: E (%)

$$\text{原料重量中の炭素重量} = B \times (A \div 1,000,000) = F \text{ (g)}$$

$$\text{メタン中の炭素重量} = C \times (D \div 100) \div 22.4 \times 12.00 \div 1,000 = G \text{ (g)}$$

$$\text{二酸化炭素中の炭素濃度} = C \times (E \div 100) \div 22.4 \times 12.00 \div 1,000 = H \text{ (g)}$$

$$\text{■炭素分解率} = (G + H) \div F \times 100 \text{ (\%-VS)}$$

## 5.5 高負荷試験 (case-3、case-4)

上記、7.0 g-VS/Lの試験において得られた結果が、一般的なものと比較して低く出ていること (VS分解率、炭素分解率等) から、投入原料のVS負荷を上げることによって菌の活性を促し、分解効率が向上するかを確認した。実施した試験区は上記

試験において結果の良かった case-3 および case-4 について実施し、VS 負荷は 7.0 g-VS/L から 14.0 g-VS/L に引き上げて試験を実施した。

結果は表 9 および図 6~8 の通りとなっているが、VS を増加させた分だけバイオガス発生量は増加しなかった。図 8 を見ると VS 量を倍にしているのに、バイオガス発生量も比例して増加することを期待するが、case-4 で 1.33 倍、case-3 に至っては 0.75 倍とバイオガス発生量が減少に転じている。その他にも VS 分解率や炭素分解率も減少することが分かった。

表 9 高負荷試験に関する結果 (バイオガス関係)

		blank	case-3	case-4
累積 BG 発生量 <sup>※1</sup>	(NmL)	1,222.40	1,840.18	2,326.60
原料から発生した累積 BG 発生量	(NmL)	-	719.31	1,153.53
原料分解日数	(日)	-	2.0	2.5
メタン濃度	(vol%)	44.98	47.73	65.88
二酸化炭素濃度	(vol%)	55.02	52.27	34.12
湿重量当たりの BG 発生量	(NmL/g-wet) <sup>※2</sup>	-	7.35	7.37
TS 当たりの BG 発生量	(NmL/g-TS)	-	43.23	64.96
VS 当たりの BG 発生量 <sup>※3</sup>	(NmL/g-VS)	-	51.33	82.30
湿重量当たりの CH <sub>4</sub> 発生量	(NmL-CH <sub>4</sub> /g-wet)	-	3.51	4.85
TS 当たりの CH <sub>4</sub> 発生量	(NmL-CH <sub>4</sub> /g-TS)	-	20.63	42.79
VS 当たりの CH <sub>4</sub> 発生量	(NmL-CH <sub>4</sub> /g-VS)	-	24.50	54.21
分解 VS 当たりの CH <sub>4</sub> 発生量 <sup>※4</sup>	(NmL-CH <sub>4</sub> /g-VS)	-	348.67	576.76

※1 : BG = バイオガス

※2 : NmL/g = Nm<sup>3</sup>/t

※3 : (投入 VS 重量) = (使用した原料重量) × (原料の VS) で算出している。

※4 : (分解 VS 重量) = (投入 VS 重量) ÷ (VS 分解率)

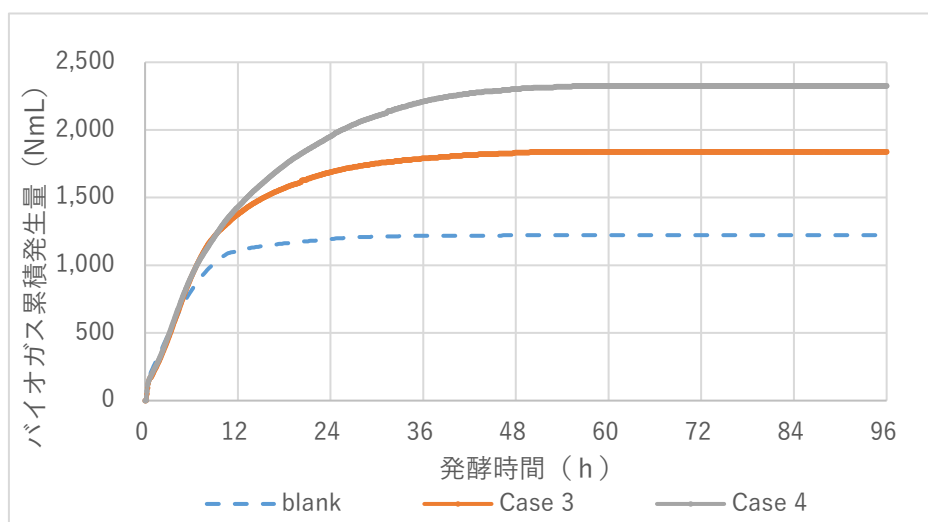


図 6 高負荷試験における各試験のバイオガス累積発生量

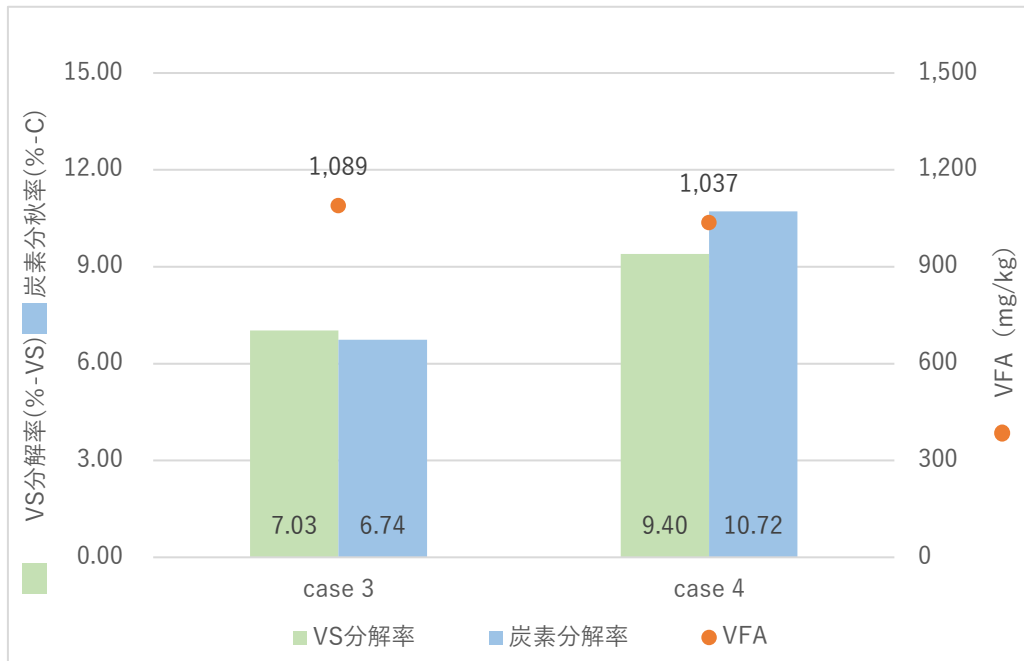


図7 高負荷試験におけるVS分解率、炭素分解率、VFA

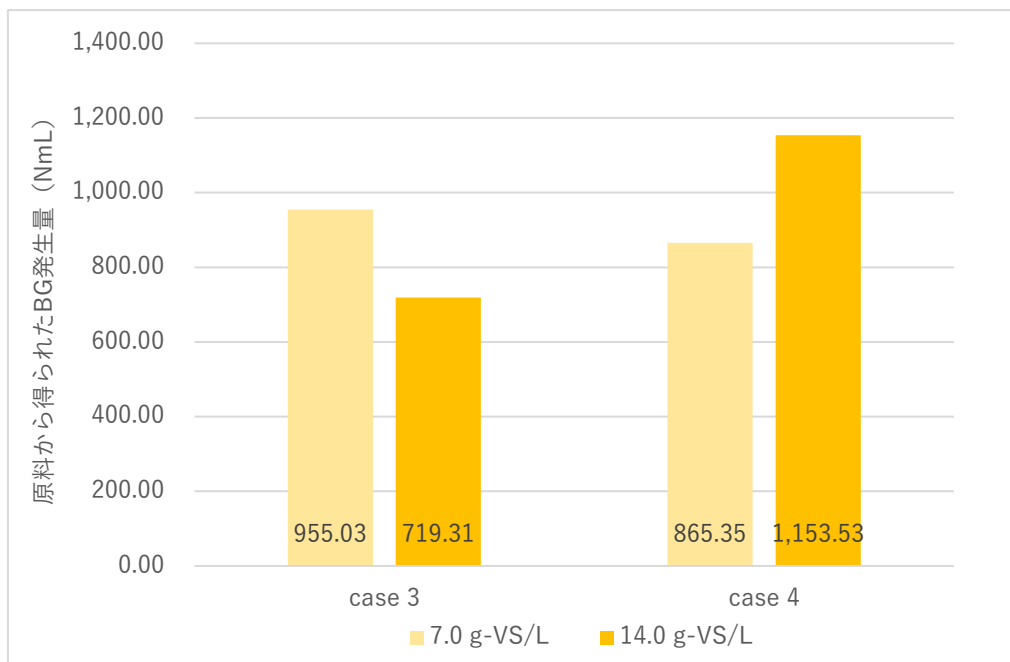


図8 原料から得られたバイオガス発生量におけるVS負荷の影響

## 6 本試験のまとめ

本試験では貴社より頂いた各サンプルを所定の割合で混合した想定投入原料を調整し、メタン発酵ポテンシャル試験を実施した。結果としては case-3 および case-4 において他の試験区より比較的多いバイオガスの発生量および各種分解率を確認することができた。

一方、一般的な原料と比べると今回調整した想定投入原料はいずれも VS 分解率が低い結果となっている（生ごみ：53%、紙ごみ：66%）。これは想定投入原料の内、オガコの割合が高いことが一因であると考えられる。オガコはセルロースのほか微生物が利用しづらいヘミセルロース、リグニンなどから構成されているため VS 分が強固で分解率が低くなりやすい。その中でグリストラップの割合が比較的高い case-3 および case-4 においては脂質の系統から菌叢への基質が供給されることで各菌叢の活性が向上し、他試験区と比較して良い結果が得られたものと考えられる（図 9）。

さらに分解率が低い値を示したことについては、VFA の蓄積がなく酸敗していなかったこと、窒素の動態に変化がなくアンモニア阻害の可能性も低いことから、発酵が阻害されたのではなく、図 10 に示す(1)微細化もしくは(2)加水分解の過程で律速になっていることが推測される。通常メタン発酵の律速反応は(5)メタン生成であり、VS 負荷を上げると VFA が蓄積するが、上記に示す(1)もしくは(2)が律速になっている場合、VS 負荷を上げても VFA は蓄積せず、本試験での事象について説明できると考える。

これらのことから投入原料の調整においては負荷を低く保つか、もしくはオガコの割合を下げる等の対策が必要である。

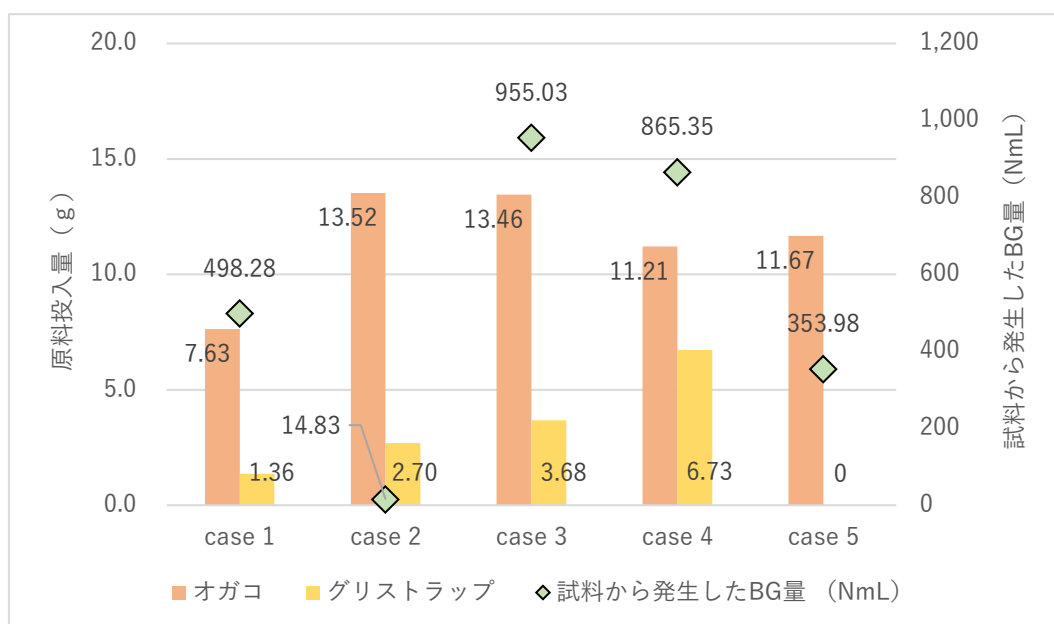


図 9 オガコ、グリストラップの投入量に対する BG 発生量の相関

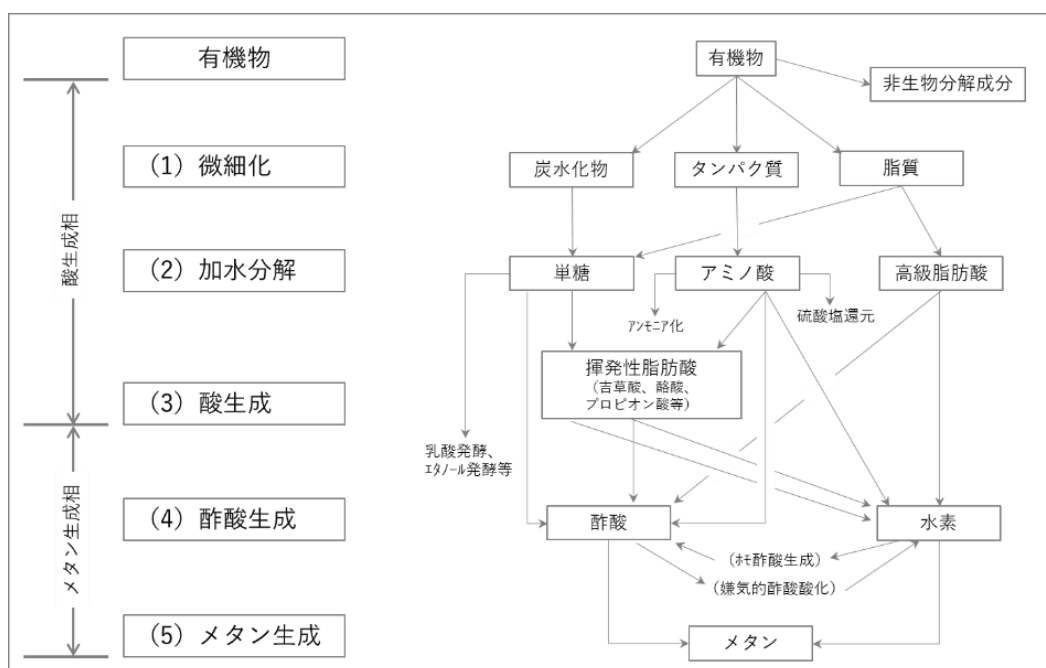


図 10 メタン発酵プロセスにおける有機性 COD 成分の代表的な生物分解反応 (ADM1)

## 7 今後の課題

本試験では各原料を混合してメタン発酵が可能であること、調整した想定投入原料のケーススタディーごとにおけるメタン発酵ポテンシャルを確認することができた。

一方、想定投入原料中のオガコの割合が高いとバイオガスの発生量や原料中の VS 分解率等に影響を与えることも示唆された。水処理が必要な湿式メタン発酵を回避し、乾式メタン発酵で施設検討を進めるにあたっては一定量のオガコを用いて含水率の調整は必要であると考え、ペーパーラッジなどをうまく活用しながら含水率とオガコの混合割合を調整することで、さらに VS 分解率やバイオガス発生量の向上を見込むことができると考える。

また発酵残渣の処理を堆肥化で検討するにあたっては未分解 VS が堆肥化処理時の基質となることで、発酵残渣が調整しやすい堆肥化原料となることも考えられる。その点も考慮した全体の処理プロセスから必要な混合割合を逆算することが理想的な原料を調整する上で肝要となると考える。

最後に、本試験は原料が持つメタン発酵ポテンシャルを確認するための回分試験であるため、連続処理における槽内の挙動やメタン発酵に与える影響は見ることができない。これについては原料割合の想定がある程度固定できてから連続試験での確認を実施するべきであると考え。