

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02286

研究課題名(和文) Power to Gas由来の水素を用いた有機性廃棄物メタン発酵の高度化

研究課題名(英文) Biogas upgrading from methane fermentation of organic waste biomass using hydrogen based on the concept of Power to Gas

研究代表者

大下 和徹(Oshita, Kazuyuki)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90346081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギー由来の余剰電力を用いた水素による有機性廃棄物のメタン発酵の高度化を目的とし、食品廃棄物と下水汚泥を用い、水素添加型の高温メタン発酵実験を行った。連続式にて、水素添加量をCO<sub>2</sub>に対し4理論当量で添加することで水素資化性メタン生成古細菌が増加し、CH<sub>4</sub>濃度は60%から80%以上まで上昇したが、過剰な水素添加では、発酵阻害が生じた。これらの現象を表現できる数理モデルを構築した。本システムをLCCO<sub>2</sub>、LCCの観点から評価したところ、CO<sub>2</sub>排出量についてはCH<sub>4</sub>濃度の更なる高度化、コストについては、水素電解装置が最も影響し、安価な水素製造がシステムの構築には必須であると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下水汚泥や、食品廃棄物なども含んだ基質種などの変化や水素添加量の増減が与える水素添加型メタン発酵への影響について、学術的な体系化に資する結果を得ることができた。近年では、九州地域で、余剰電力による出力調整が生じていること、メタン発酵槽を有する下水処理場内に、太陽光パネルを設置する例もみられており、将来的に日本でも本システムが実用化される可能性は高い。さらには、化石燃料などの熱分解で生じた水性ガスを水素源として、石炭・石油火力発電所、セメント・製鉄工場、廃棄物焼却施設から発生するCO<sub>2</sub>をメタン化し、温室効果ガス排出量抑制に大きく寄与できるものと考えている。

研究成果の概要(英文)：In order to advance the methane fermentation of organic wastes with hydrogen using surplus electricity derived from renewable energy sources, experiments were conducted using food waste and sewage sludge in a hydrogenated high-temperature methane fermentation process. In a continuous experiment, the addition of hydrogen at four theoretical equivalents of CO<sub>2</sub> increased the number of hydrogenotrophic methanogenic archaea, and the CH<sub>4</sub> concentration increased from 60% to over 80%, but excessive hydrogen addition caused fermentation inhibition. A mathematical model was developed to represent these phenomena. The evaluation of this system in terms of LCCO<sub>2</sub> and LCC showed that for CO<sub>2</sub> emissions, further upgrading of CH<sub>4</sub> concentration and for cost, the hydrogen electrolyzer had the greatest impact, and inexpensive hydrogen production was considered essential for the establishment of the system.

研究分野：廃棄物工学

キーワード：Power to Gas バイオメタネーション 有機性廃棄物 メタン発酵 水素 バイオガス 下水汚泥 LCC  
02

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

食品廃棄物、厨芥類、下水汚泥などの有機性廃棄物は、世界的にも莫大な量が発生しているが、バイオマスとして位置づけられ、そのエネルギー利用が、古くから重要視されている。これらのエネルギー利用には、メタン発酵により生物学的エネルギー転換し、生成したバイオガスの利用が主流となっている。しかしながら、得られるバイオガスの組成は、通常の場合 CH<sub>4</sub>: 40~60%、CO<sub>2</sub>:40~60%であり、CO<sub>2</sub>はエネルギーとして用いることができない。都市ガス導管注入や、自動車燃料など高度なバイオガス利用においても、エネルギーを投入してCH<sub>4</sub>のみを分離し、約半分のCO<sub>2</sub>は大気中へ廃棄している例がほとんどである。

ところで、欧州においては、意欲的な温室効果ガス排出削減目標が掲げられ、バイオマス等の安定型再生可能エネルギーに加えて、太陽光発電や風力発電が積極的に導入されている。しかし、これらは気象条件によって発電量が変動し、発電量が電力需要を上回るときは余剰電力が発生する。余剰電力の貯蔵には、現時点では、蓄電池にも立地や容量、供給能力、コスト等の課題がある。このような状況下で注目されているのが Power to Gas（電力からガスへ）と呼ばれる技術である。具体的には廃棄せざるを得ない、場合によっては有償で買い取ってもらわなければならない余剰電力により水を電気分解し、得られた水素を直接利用する、あるいは水素と二酸化炭素を反応させてメタンを生成し利用する方法がある。特に後者は、パイプライン等のガスインフラが充実している欧州では注目され、以下の反応式により説明され、メタン発酵において、副次的に生じる水素とCO<sub>2</sub>から水素資化性メタン生成細菌によりメタンを生じる反応と同様の反応である。図1に一連のPower to Gasの概念を示す。

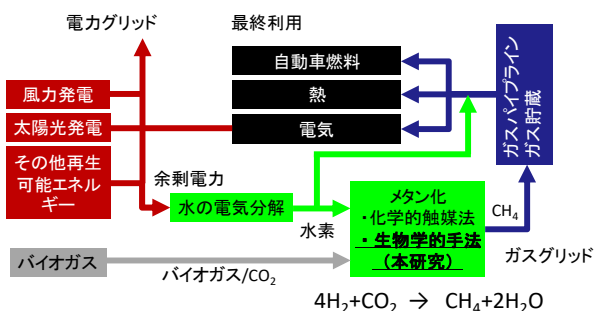
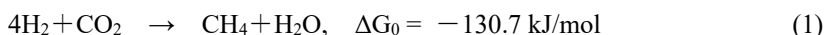


図1 Power to Gas による余剰電力利用の概念図



すなわち、メタン発酵リアクターに、水素を注入すれば、上記の反応によりエネルギーとして利用できない約半分のCO<sub>2</sub>のメタン化が進行し、バイオガス中のメタン濃度を上昇できる可能性がある。しかしながら、水素の添加量がCO<sub>2</sub>に対して過剰になると、酢酸が蓄積して、発酵阻害が生じるといった報告もある<sup>1)</sup>。有機性廃棄物のメタン発酵は、代謝反応が異なる微生物グループが関与する複雑な反応から成り、メタン発酵槽中では様々な反応産物がバランスされた濃度で液中に存在する必要がある。したがって、水素添加メタン発酵では、水素添加量、基質の種類、微生物叢、温度等の条件によっては、有機酸の蓄積、あるいは重炭酸イオンの過消費などにより、pHが変化し、反応阻害が発生する可能性もあるが、これらの点については、体系的に明らかにされていない。したがって、水素添加により、確実にCO<sub>2</sub>をCH<sub>4</sub>に変換し、持続可能なシステムとするための必要条件を明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、Power to Gasにより得られる水素を用いた有機性廃棄物メタン発酵の高度化を目的とする。具体的には、基質の種類や濃度、微生物叢、温度、水素添加方法を変化させた、水素添加型メタン発酵実験を伴う種々の分析・解析を行い、バイオガス中メタン濃度が確実に上昇できる条件に加えて、反応阻害が生じない持続可能なシステムとして成立する条件を体系化する。

### 3. 研究の方法

本研究では基質として下水汚泥、および食品廃棄物を用い、それぞれについて水素添加型メタン発酵実験を行った。以下に、それぞれの基質や実験方式ごとに研究方法を示す。

#### (1) 下水汚泥を基質としたバッチ実験

下水汚泥は、55°Cで湿式高温メタン発酵しているA下水処理場にて、メタン発酵槽投入汚泥(TS:3.33%、VS: 2.75%)および種汚泥として、消化汚泥(TS:1.86%、VS: 1.17%)をサンプリングした。これらの混合物(VS比1:1)20mLを122mLのバイアル瓶に入れN<sub>2</sub>で曝気し、ゴムおよびアルミ製のキャップで封をした。これらの操作により、バイアル瓶のヘッドスペースを102mLとした。次に、シリンジを用いてN<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を置換し、H<sub>2</sub>添加量を0~120mLに調整した。この時のH<sub>2</sub>/投入VS比は0~360mL/gVSin(投入ベース)である。バイアル瓶を恒温振とう機(ヤマト科学株式会社製:BT300)に入れ、55°C、90rpmで振とうした。同条件のバイアル瓶を複数用意し、発酵開始後1~15日後に取り出し各分析に供した。

#### (2) 食品廃棄物を基質とした半連続式実験

食品廃棄物(TS:8.87%、VS: 8.54%)は、食品工場から排出される食品廃棄物(パン、和菓子、豆腐などの食品工場残渣)であり、同工場では、この食品廃棄物を湿式高温メタン発酵(55°C)処理

し、バイオガス発電を実施している。種汚泥としては本メタン発酵の消化汚泥(TS:1.81%、VS:1.59%)を用いた。実験装置は容積 5L(有効容積:2.4L)の連続攪拌反応器(A および B)を使用した。図 2 および図 3 に、本反応器の図と写真を示す。両反応器とも、消化汚泥を最初に充填し、反応器内の温度を高温消化条件(55 °C)に制御した。反応器への基質投入は、1 日 1 回、HRT が 20 日、OLR が 2.5(kgVS/m<sup>3</sup>/日)になるように実施し、同量の消化汚泥を引き抜いた。反応器内の汚泥はマグネチックスターラーで混合し、2 種類の攪拌速度(45 および 135rpm)で実施した。約 30 日間の馴致期間を経て反応器が定常運転状態に達した後(定常運転状態は、バイオガス生成量の日間変動が 10%未満で 6 日間連続した状態とした)、H<sub>2</sub> を 1 日 1 回ガスバッグに注入し、反応器 B にのみ供給した。反応器 B は H<sub>2</sub> 注入なしの対照系として運転した。反応器 A の H<sub>2</sub> 注入流量は、添加しない系(ステージ 1)の後、2.4 L/日とし、その後 4.8、7.2、9.6 L/日に段階的に増加させた。汚泥と水素の接触を抑えるため、H<sub>2</sub> ガスはガラス製ディフューザーを用いて反応器 B の汚泥表面下 5cm を目安に供給し、発生したバイオガスとともにガスバッグ、チューブポンプ経由で 10.8L/h で循環させた。

### (3) 下水汚泥を基質とした半連続式実験

下水汚泥はバッチ式実験で用いたものと同様の汚泥を適宜サンプリングして用いた。実験装置は図 2、図 3 に示したものと概ね同様のものを用いたが、攪拌速度を 30rpm に低下させるとともに、反応器への基質投入は、週 2 回、HRT が 18.6~18.9 日、OLR が 1.0(kgVS/m<sup>3</sup>/日)になるように実施し、同量の消化汚泥を引き抜いた。H<sub>2</sub> ガスを含むバイオガスは、反応器 B に対し、1 日 1 回、孔径 100 $\mu$ m の焼結金属を用いて分散させ、ガスバッグ、チューブポンプ経由で 0.5L/day で循環させた。実験では、約 60 日間かけて OLR を段階的に 1.0(kgVS/m<sup>3</sup>/日)上昇させた後(Phase 1~5)、反応器 A への水素添加を段階的に増加させ H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> モル比で式(1)の量論比に相当する 4.0 近くになるまで実験を継続した(Phase 6~16)。反応器 A への H<sub>2</sub> 投入条件を図 4 に示す。

### (4) 分析方法

投入基質、および消化汚泥の TS、VS、S-COD を下水試験方法に従って測定した。バイオガスはバイアル、あるいはサンプリング容器からシリンジを用いて採取し、ガスクロマトグラフ(Agilent Technologies, 490 Micro GC)で CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> を分析した。pH は pH メーター(堀場製作所製、D-71S)により測定した。揮発性有機酸(VFA)は高速液体クロマトグラフィー(Shimadzu, CDD-10AVP HPLC)で測定した。VFA 分析前に、まず引き抜いた消化汚泥を 3,000 rpm で 15 分間遠心分離し、上澄みを孔径 0.45  $\mu$ m のフィルターでろ過し、共存する夾雑粒子を除去した。また適宜、基質、およびメタン発酵残渣に対し、微生物叢を解析するため、次世代シーケンシング(NGS 解析)による分析を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 下水汚泥を基質としたバッチ実験

H<sub>2</sub> 添加によるバイオガス組成の変化について検討した。H<sub>2</sub> 添加量を変化させ、発酵を 15 日間行った時の CH<sub>4</sub> 収率(投入発酵原料中 VS:1g あたりの CH<sub>4</sub> 生成量)と CH<sub>4</sub> 濃度及び VS 分解率を図 5 に示す。H<sub>2</sub> 添加量 0mL/g-VSin の時の CH<sub>4</sub> 収率は 170mL/g-VSin であり、CH<sub>4</sub> 濃度は 64% であった。H<sub>2</sub> 添加量 130mL/g-VSin の際、CH<sub>4</sub> 収率は 219mL/g-VSin、CH<sub>4</sub> 濃度 72% となり、H<sub>2</sub> 添加による、バイオガスの高品質化が確認された。しかし、H<sub>2</sub> 添加量を 260、390mL/g-VSin と増やしていくにつれて CH<sub>4</sub> 濃度は 83%、99% と向上したが、CH<sub>4</sub> 収率は 150、20mL/g-VSin と減少した。

H<sub>2</sub> 添加量 0mL/g-VSin における VS 分解率は 73.3% であった。H<sub>2</sub> 添加量が増加するにつれて VS 分解率は減少していき、H<sub>2</sub> 添加量 390 mL/g-VSin における VS 分解率は 25.7% となった。H<sub>2</sub> 添加

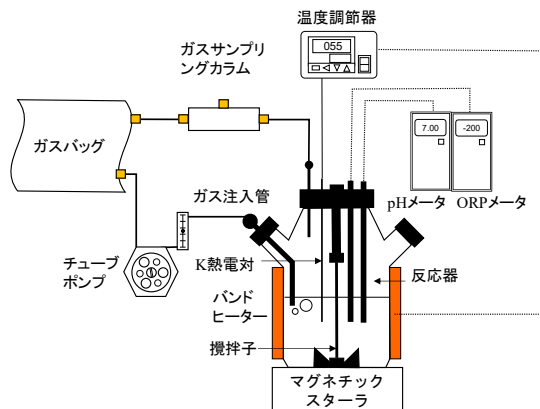


図 2 水素添加型メタン発酵実験装置



図 3 実験装置写真(対照系含む)

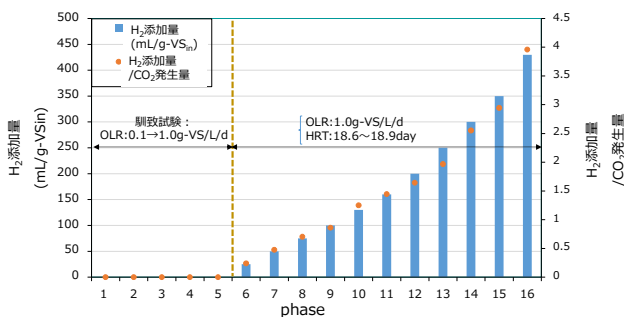


図 4 水素添加系(反応器 A)における水素添加量

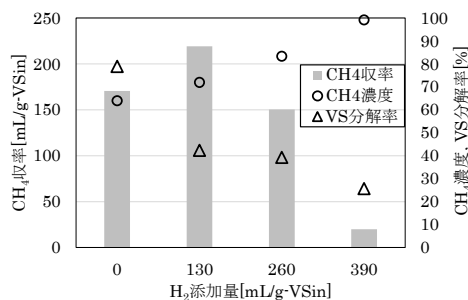


図 5 下水汚泥を基質としたバッチ実験における CH<sub>4</sub> 収率および、VS 分解率

量 130 mL/g-VSin の条件においては CH<sub>4</sub> 収率並びに CH<sub>4</sub> 濃度のいずれもが向上していたにも関わらず VS 分解率は 42.4% と低下していた。従って、H<sub>2</sub> の添加は式(1)による CO<sub>2</sub> のメタン化は進行させるが、有機物の分解は阻害する可能性が考えられる。さらに、過剰量の H<sub>2</sub> 添加となる 260、390mL/g-VSin では CO<sub>2</sub> が枯渇し、pH が 8.2~9.0 まで上昇し、メタン発酵の適正 pH を超え、有機酸蓄積が開始されており、CH<sub>4</sub> 収率の低下を引き起こすことが分かった。

### (2) 食品廃棄物を基質とした半連続式実験

実験は、全体で約 270 日間実施した。各運転条件の定常運転状態は、VFA とバイオガス生成が比較的安定した値に達した約 7 日間の運転後に得られた。ステージ 1 では、H<sub>2</sub> の添加無しで、反応器 A の攪拌速度を 45rpm、反応器 B の攪拌速度を 135rpm とした。図 6 に、両反応器のステージ 1 におけるバイオガスの発生状況およびバイオガス中 CH<sub>4</sub> 濃度の推移を示す。攪拌速度は異なるが、10 日後には両反応器の各数値は非常に近くなり、CH<sub>4</sub> 濃度は概ね 52% で安定した。これは、この 2 つの範囲での攪拌速度はメタン発酵系に影響を与えないことを意味する。言い換えれば、基質、種汚泥の均一な分布を達成するためには、どちらの攪拌速度も許容できることを意味している 2)、3)。

ステージ 2 からステージ 5 までのバイオガス組成を図 7 に示す。この間発生するバイオガスは反応器 A、B とともにほとんど変化がなく、8~10L/day で安定していた。ステージ 2 では、反応器 A でのメタン濃度は 56% まで上昇する傾向がみられ、CO<sub>2</sub> 濃度は 35.5% まで減少した。この際に、バイオガス中の H<sub>2</sub> は 7.4% 程度増加し、注入した H<sub>2</sub> が反応に至らず余剰となっていると考えられた。攪拌速度を上昇させたステージ 3 では、反応器 A の H<sub>2</sub> 濃度は 7.4% から 2.0% に減少し、その結果、反応器 A の CH<sub>4</sub> 濃度は 60.8% に増加した。このバイオガスの H<sub>2</sub> 含有量の減少は、H<sub>2</sub> の気液物質移動の制約によって説明でき

3)、攪拌強度の上昇に伴って、より多くの H<sub>2</sub> が溶解し、CH<sub>4</sub> への変換が促進された可能性がある。ただし、この場合、CO<sub>2</sub> 濃度は、変化していないことから、H<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> 以外の炭素源から有機酸が生成され、CH<sub>4</sub> 生成された経路があるか、CO<sub>2</sub> の気液平衡により、液相の HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> から CO<sub>2</sub> が生成している可能性もある。ステージ 5 では、反応器 A の H<sub>2</sub> 濃度は 1.4% に減少し、CH<sub>4</sub> 濃度は 75.7% に増加し、CO<sub>2</sub> 濃度は 25.4% に減少した。これらのステージでは、H<sub>2</sub> 注入量と CH<sub>4</sub> 量の増加が概ね式(1)の量論比で示されることが明らかとなった。ただし CO<sub>2</sub> の減少量は量論比よりも低く、前述のように、異なる経路での CH<sub>4</sub> 生成や CO<sub>2</sub> の気液平衡の影響があると推察される。

しかし、図 8 に示すように、244 日目に 9.6L/日の H<sub>2</sub> を注入すると、反応器 A のバイオガス生成が急速に低下後、完全停止した。この時、反応器内の残留バイオガスは、CH<sub>4</sub>:67%、CO<sub>2</sub>:28.3%、H<sub>2</sub>:3.0% であった。つまり、H<sub>2</sub> は消費されているが、CH<sub>4</sub> には変換されていないことになる。添加した H<sub>2</sub> が、ホモ酢酸生成経路にて酢酸になったことが想定される。酢酸濃度の急増 (244 日目:155 mg/L から 245 日目:852 mg/L) も認められたが、蓄積した酢酸が添加した H<sub>2</sub> によるものか基質によるものかは判別不能である。反応器 A では、H<sub>2</sub> の添加を止め、その後数日間は基質のみを投入したが、やはりバイオガスの生成は確認されなかった。同時に、pH は 6.2 まで減少し、245 日目から酢酸と同様にプロピオン酸も増加し、数千 mg/L のオーダーで蓄積した。250 日目に基質の投入を停止したが、反応器 A では、システムの崩壊を止めることができなかった。以上のように、本実験でも H<sub>2</sub> 過剰添加は発酵阻害につながる事が確認された。

### (3) 下水汚泥を基質とした半連続式実験

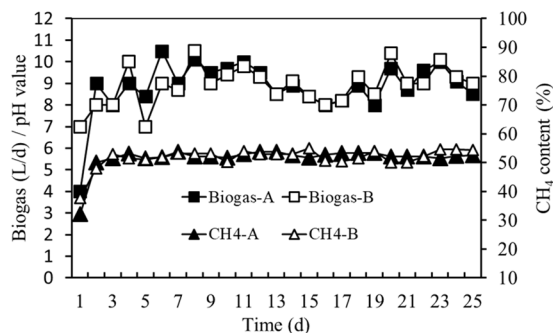


図 6 ステージ 1 におけるバイオガス発生量とメタン濃度の推移

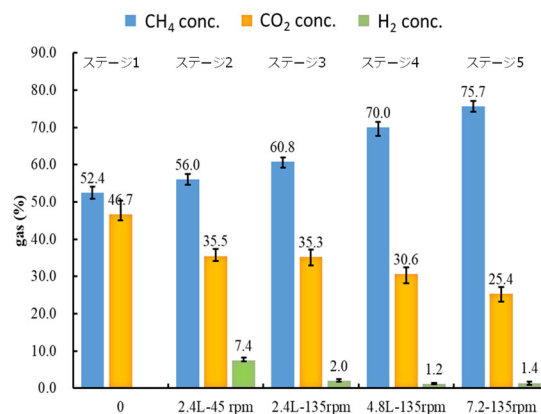


図 7 各ステージのバイオガス組成の推移

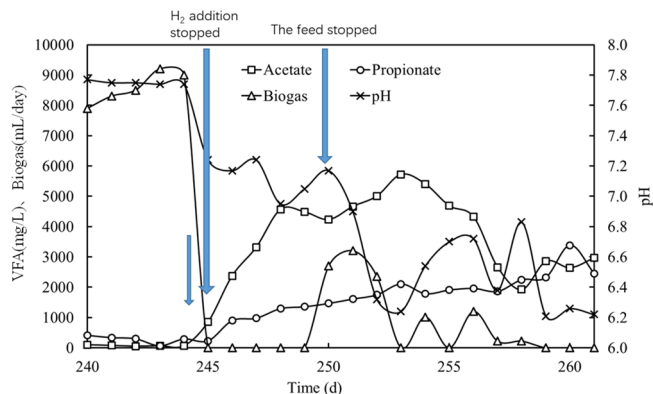


図 8 水素添加によるシステム崩壊の推移

実験は、全体で約 250 日間実施した。馴致期間以降の Phase 6~16 における CH<sub>4</sub> 収率、および CH<sub>4</sub> 濃度の推移を図 9 に示す。図より H<sub>2</sub> 添加量の増大に伴って、CH<sub>4</sub> 収率並びに CH<sub>4</sub> 濃度が向上し、バイオガスの高品質化が達成された。具体的には、Phase16 において、CH<sub>4</sub> 収率が 0.24L/g-VSin となり、Phase 6 に対して 0.08 L/g-VSin の増加と、CH<sub>4</sub> 濃度が 82%まで向上した。しかし、Phase16 では、概ね式(1)での量論比での添加で

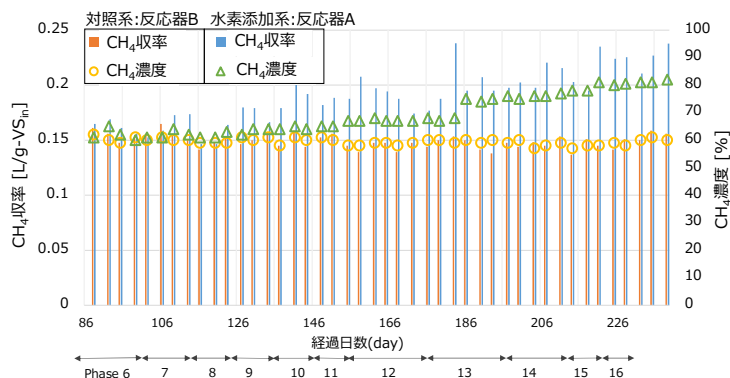


図 9 下水汚泥基質における水素添加メタン発酵実験の CH<sub>4</sub> 収率、CH<sub>4</sub> 濃度の推移

H<sub>2</sub> も完全に消費されたが、CH<sub>4</sub> 濃度が 82%で停滞し、CO<sub>2</sub> もガス中に残留している状態であった。反応器 A での VFA は Phase11 以降、反応器 B との、CH<sub>4</sub> 収率並びに CH<sub>4</sub> 濃度の差が明確になり始めたあたりから、酢酸の蓄積が見られ始めホモ酢酸生成経路により、H<sub>2</sub> が消費され、酢酸が生成され始めたものと推測される。図 10 に、種汚泥としての消化汚泥、および馴致が完了した Phase5、および Phase10 における微生物菌叢解析結果を示す。図より、Phase 10 において水素資化性メタン菌 (*Methanothermobacter*) の 16S rRNA 遺伝子数が Phase 5 の 1.6 倍に増加する一方で、酢酸資化性メタン菌 (*Methanosarcina*) の 16S rRNA 遺伝子数が 0.05 倍に減少し、ホモ酢酸生成経路による酢酸の生成に加え、水素添加系後半(phase 11 以降)における酢酸蓄積に繋がった可能性が考えられた。

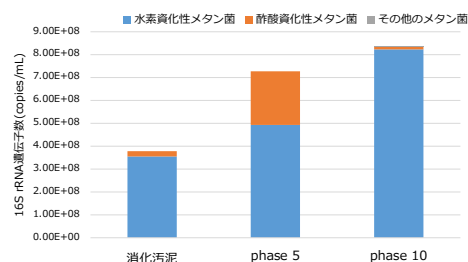


図 10 水素添加メタン発酵における微生物叢の

以上より現時点での水素添加型メタン発酵(*in-situ*)方式では、得られる CH<sub>4</sub> 濃度に上限があり 80%程度と予測される。ただしこの方式では、外部に特化した反応槽を設置する *ex-situ* 方式と異なって、新たな反応器を新設する必要がないなど利点も多い。*in-situ* 方式は、有機酸発酵後に H<sub>2</sub> 添加を行う 2 相方式の採用や、*ex-situ* 方式とのハイブリッド型等の応用により性能を高めることが期待できる。

#### (4) 本システムの LCCO<sub>2</sub>、LCC 解析

最後に下水汚泥のメタン発酵へ、水素添加型メタン発酵(*in-situ*)を導入した際のライフサイクル CO<sub>2</sub>、およびコスト解析を実施した。対象は本研究で下水汚泥を採取した A 下水処理場とし、評価範囲は、汚泥のメタン発酵槽投入(規模: 160,000m<sup>3</sup>/年)から、バイオガスの有効利用、発酵残渣の脱水および焼却までとした。シナリオとしては、発生バイオガスの利用方法として、Case1: ボイラ燃焼による熱供給、Case2: 汚泥焼却の補助燃料、Case3: ガスエンジンによるコジェネレーション、Case 4: CO<sub>2</sub> 分離後、バイオメタンのガス導管注入、Case 5: *in-situ* 方式+CO<sub>2</sub> 分離後、バイオメタンのガス導管注入、Case 6: *ex-situ* 方式+CO<sub>2</sub> 分離後、バイオメタンのガス導管注入とした。なお H<sub>2</sub> の発生は水電解で行うものとし、これに投入される電力は再生可能エネルギーの利用を前提とした。LCC に関してはイニシャルコスト、ランニングコスト 15 年間を合計し、1 年間の値として算出し、LCCO<sub>2</sub> については運用のみの段階を考慮した。図 11 に試算結果を示す。計算結果はシステムにおいて変化がある部分のみを抜き出して示した。図より最も CO<sub>2</sub> 排出量が低くなるのは Case 6: *ex-situ* 方式であり、続いて Case 3 のガスエンジンによるコジェネレーション、Case 5: *in-situ* 方式であった。この結果について *in-situ* 方式では CH<sub>4</sub> 濃度を 80%としており、その影響が大きく、CH<sub>4</sub> 収率の高度化が今後の課題となる。一方、コストに関して Case 3 のガスエンジンによるコジェネレーションが最も低くなり、Case 5: *in-situ* 方式、および Case 6: *ex-situ* 方式であり、これは水電解装置に由来する部分が最も大きく、安価な H<sub>2</sub> の供給が今後重要であると考えられた。

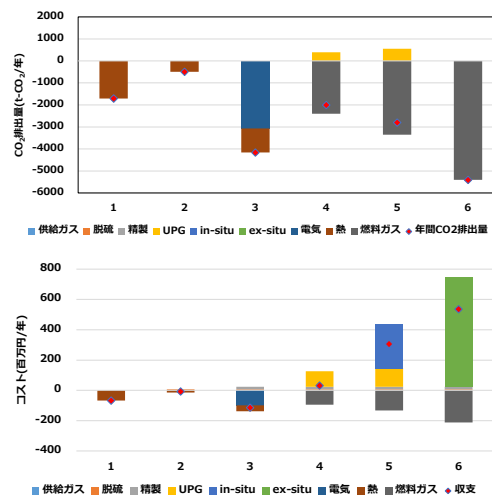


図 11 バイオガス利用システムの LCCO<sub>2</sub>、LCC 解析結果

<引用文献>

- 1) Agneessens et al., *Bioresource Technology*, Vol.233, pp.256-263 (2017).
- 2) Vavilin, V.A. and Angelidaki, I.: *Biotechnol Bioeng* Vol.89, No.1, pp.113-122 (2005)
- 3) Kaparaju, P., et al.: *Bioresource Technology*, Vol.99, No.11, pp.4919-4928 (2008)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 新田大知, 大下和徹, 高岡昌輝, 日下部武敏, 伊藤竜生, 佐藤夏紀, 水野志穂, 木村克輝, 羽深昭	4. 巻 27
2. 論文標題 バッチ式反応器での異なる水素添加量に対するBiological Biogas Upgradingの応答	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EICA	6. 最初と最後の頁 119-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hafuka Akira, Fujino Sota, Kimura Katsuki, Oshita Kazuyuki, Konakahara Naoya, Takahashi Shigetoshi	4. 巻 828
2. 論文標題 In-situ biogas upgrading with H <sub>2</sub> addition in an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) digesting waste activated sludge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 154573 ~ 154573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2022.154573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 大下和徹	4. 巻 46
2. 論文標題 食品廃棄物のメタン発酵における生物学的in-situバイオガスアップグレーディング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 再生と利用	6. 最初と最後の頁 58-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 日高平	4. 巻 46(4)
2. 論文標題 下水汚泥の嫌気性消化槽に水素を投入するバイオメタネーション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 水環境学会誌	6. 最初と最後の頁 134-137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 新田 大知, 大下 和徹, 高岡 昌輝, 日下部 武敏, 高橋 滋敏, 小中原 亨, 水野 志穂, 木村 克輝, 羽深 昭	4. 巻 35(3)
2. 論文標題 バッチ式反応器による水素添加メタン発酵の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 環境衛生工学研究	6. 最初と最後の頁 100-102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 足立響, 日高平, 西村文武, 坪田潤	4. 巻 35(3)
2. 論文標題 バイオメタネーションによる水素および二酸化炭素からのメタン生成	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 環境衛生工学研究	6. 最初と最後の頁 103-105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chenchen Li, Kazuyuki Oshita, Masaki Takaoka, Takashi Fujimori and Taketoshi Kusakabe	4. 巻 Vol. 25, Nos. 2-3
2. 論文標題 Use of Exogenous Hydrogen for Thermophilic Digestion of Wastewater Sludge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EICA	6. 最初と最後の頁 79-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 大下和徹
2. 発表標題 有機性廃棄物メタン発酵における生物学的バイオガス アップグレーディング
3. 学会等名 新たなエネルギー資源を求めて ~創エネルギー技術開発の取り組み~ 環境技術学会「若手の会」・廃棄物資源循環学会 若手の会 合同セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 足立響, 日高平, 西村文武, 坪田潤
2. 発表標題 嫌気性消化槽へ水素を供給するバイオメタネーションの適用性
3. 学会等名 第59回下水道研究発表会講演集
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福谷 哲 (Fukutani Satoshi) (00332734)	京都大学・複合原子力科学研究所・准教授  (14301)	
研究分担者	日高 平 (Hidaka Taira) (30346093)	京都大学・工学研究科・准教授  (14301)	
研究分担者	日下部 武敏 (Kusakabe Taketoshi) (40462585)	京都大学・工学研究科・助教  (14301)	
研究分担者	高岡 昌輝 (Takaoka Masaki) (80252485)	京都大学・工学研究科・教授  (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------