

応用化学・生命工学専攻		学籍番号	第 239401 号	指導教員	大門 裕之 小口 達夫
氏名	金子 光瑠				

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	粒状活性炭および電圧印加技術を用いた メタン発酵技術の高効率化と普及に向けた研究
---------	---

近年、カーボンニュートラル社会および資源循環型社会の実現に向けて、バイオマスを再生可能エネルギーへと変換するメタン発酵技術が注目されている。メタン発酵は畜産糞尿や食品廃棄物などのバイオマスを基質として、メタンを主成分とするバイオガスを生成する技術である。この技術はバイオマス利活用とエネルギー回収を同時に達成できる点で高い社会的意義を有する。一方で、メタン発酵技術は微生物反応に基づくプロセスであるため、基質の性状や運転条件に影響を受けやすい。そのため、メタン発酵技術の高効率化や消化液の利活用には依然として課題が多く、社会実装および普及の促進において阻害要因である。

本博士論文では、粒状活性炭 (Granular Activated Carbon; GAC) の添加および電圧印加技術 (Microbial Electrochemical Technology; MET) を用いることでメタン発酵における不安定な挙動の改善を目指した。特に、基質の有機物濃度を軸に GAC や MET がメタン発酵の挙動および微生物群集構造にどのような効果を与えるか明確化することを目的とした。

はじめに、異なる有機物負荷 (Organic Loading Rate; OLR) 条件において GAC の添加量がメタン生成量や微生物群集構造などに与える効果を評価した。その結果、高 OLR 条件における GAC の添加は VFA の蓄積を抑制し、pH を安定化させることでメタン生成量およびメタン濃度を向上させることが分かった。また、GAC 添加量に依存して微生物群集構造が変化し、直接的異種間電子移動の促進が発酵の安定性に寄与している可能性が示唆された。次に、高脂質の廃棄物であるグリストラップ廃棄物を対象とし、種汚泥と基質の有機物比の最適化および GAC の添加による発酵の安定性を評価した。その結果、グリストラップ廃棄物は前処理が不要で単独基質として利用できるバイオマスであることを初めて明らかにすることができた。

次に、微生物間の電子移動を促進する手法として MET に着目し、電圧値と OLR の相関を包括的に検討した。その結果、MET による効果は単一の電圧条件で一義的に決定されるものではなく、OLR に強く依存することが分かった。また、Anode と Cathode を異なる発酵槽に導入した系を作成し、各電極の役割を微生物群集構造解析などを通じて評価した。その結果、電極ごとに特徴的な微生物群集構造が形成され、特に Cathode 側において水素資化メタン生成菌の活性化が示唆された。加えて、連続式メタン発酵において水理学的滞留時間 (Hydraulic Retention Time; HRT) を 5 日まで短縮した条件においても、MET の導入により安定したメタン生成が可能であることを示し、発酵槽の小型化や発酵の高効率化に繋がる知見を得た。さらに、発酵残渣である消化液を法面緑化へ適用可能か評価した。その結果、従来の化成肥料と同等の緑化効果を示したことから、消化液およびメタン発酵システムの高付加価値化に寄与する知見を得た。

以上より、本研究では GAC および MET という異なる手法に対して、微生物間の電子移動を促進するという共通点に着目した。また、OLR、基質の特性、HRT、微生物群集構造、消化液の利活用など、多岐にわたって包括的に評価した点に新規性を有する。本研究で得られた知見は、高 OLR で HRT を短縮した条件において安定的なメタン発酵システムの確立に寄与するだけでなく、GAC の添加や MET によって微生物の働きを制御できる可能性を示した点に特徴がある。さらに、小規模分散型システムへの応用、高脂質な廃棄物のバイオマス化、消化液の利活用までを一貫して検討したことで、エネルギー回収と資源循環を両立できるメタン発酵システムの可能性を示した。本成果は今後のメタン発酵システムの普及に役立つ重要な知見である。

Date of Submission (month day, year) : March 26, 2026

Department of Applied Chemistry and Life Science	Student ID Number D239401	Supervisors Hiroyuki Daimon Tatsuo Oguchi
Applicant's name Hikaru Kaneko		

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Study on Enhancement and Dissemination of Methane Fermentation Technology using Granular Activated Carbon and Microbial Electrochemical Technology
-----------------	--

Methane fermentation technology is attracting attention to converting biomass into renewable energy for a carbon-neutral society and a resource-circulating society. This technology produces biogas mainly containing methane from biomass such as food waste and livestock manure. It is socially important because it can achieve both biomass utilization and energy recovery. However, methane fermentation is based on microbial reactions, so it is easily affected by substrate properties and operating conditions. Therefore, significant challenges remain in improving methane fermentation efficiency and utilizing digestate, hindering the social implementation and dissemination of this technology.

This doctoral dissertation aimed to improve unstable behavior in methane fermentation by using granular activated carbon (GAC) and microbial electrochemical technology (MET). The main purpose was to clarify how GAC and MET affect methane fermentation performance and microbial community structure, focusing on organic matter concentration of substrate.

The effects of different amounts of GAC on methane production and microbial community structure under various organic loading rate (OLR) conditions were evaluated. The results showed that GAC addition under high OLR conditions improved methane production and methane concentration by stabilizing pH. Microbial community structure also changed depending on the amount of GAC. This result suggests that enhanced direct interspecies electron transfer contributed to fermentation stability. In addition, grease trap waste, which is a high-lipid waste, was examined as a substrate. The effects of optimization of the organic matter ratio between substrate and inoculum and GAC addition were evaluated. The results showed for the first time that grease trap waste can be used as a single substrate without pretreatment.

Microbial electrochemical technology was studied as a method to promote electron transfer between microorganisms. The relationship between applied voltage and OLR was analyzed. The results showed that the effect of MET did not depend on a single voltage condition and strongly depended on OLR. An experimental system was also developed in which the anode and cathode were installed in separate fermentation reactors. The roles of each electrode were evaluated using microbial community analysis. Characteristic microbial communities were formed on each electrode. Enhanced activity of hydrogenotrophic methanogens was suggested on the cathode. In addition, stable methane production was achieved by using MET even when the hydraulic retention time (HRT) was shortened to five days. These results provide useful knowledge for reactor downsizing and improving fermentation efficiency. The applicability of digestate as a fertilizer for slope greening was also evaluated. The results showed that digestate had greening effects like those of chemical fertilizers. This finding suggests that digestate can increase the value of methane fermentation systems.

Overall, this study focused on GAC and MET as different methods that promote electron transfer between microorganisms. The novelty of this research is the comprehensive evaluation of OLR, substrate characteristics, HRT, microbial community structure, and digestate utilization. The results contribute to the establishment of stable methane fermentation systems under high OLR and short HRT conditions. This study also showed that microbial activity can be controlled by GAC and MET. Furthermore, by examining small-scale systems, high-lipid waste utilization, and digestate use, this study demonstrated the potential of methane fermentation systems to achieve both energy recovery and resource circulation. These findings provide important knowledge for the future development of methane fermentation technology.