

氏 名	おし べ ひろし
授 与 学 位	押 部 洋
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成29年9月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
指 導 教 員	食品廃棄物を対象とした小規模メタン発酵システムの高効率化に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 李 玉友 東北大学教授 西村 修
	東北大学准教授 佐野 大輔 東北大学准教授 久保田 健吾

論文内容要旨

本論文は6章から構成される。以下に各章の要旨をまとめる。

第一章 序論

地球環境の保全と循環型社会の実現のために、食品廃棄物の再利用率向上が求められている。メタン発酵はバイオガスの燃料利用と廃棄物量を低減できることから、食品廃棄物リサイクルの観点から有効な技術として注目されている。今日では食品廃棄物を1か所に集約し大規模にメタン発酵する事業が普及している。しかし、大規模なメタン発酵によるエネルギー回収の計画がない場合や、地理的要因で食品廃棄物の集約が不合理である場合には、より分散的でかつ小規模にメタン発酵を適用することが望まれる。そこで、本研究では事業所内で発生した食品廃棄物を敷地内でメタン発酵と排水処理を行う新たなシステムを提案する。最初に、事業所単位の小規模システムとしてメタン発酵を適用した場合における課題の抽出とその解決策の検討を行い、新規発酵槽による運転動力の効率化と排水処理を組み合わせた新規メタン発酵システムの構築を行う。提案した新規システムの動作性能を実験によって評価し、食品廃棄物の新たなリサイクルシステムとしての有効性を示すことを目的とする。

第二章 既往研究の調査と研究課題の整理

食品廃棄物を対象としたメタン発酵に関する既往研究の調査を行い、本研究の課題を整理した。

食品廃棄物を対象としたメタン発酵に関する多くの文献より、食品廃棄物と発酵排水の性状を分析することで、バイオガスの発生量や減容化率を評価することが可能である。また、安定的なメタン発酵を行うために、メタン発酵槽の運転方式や制御因子が明らかになっている。これらの知見を活用して、新たに提案するメタン発酵槽の処理性能を評価することが可能であることが分かった。

一方、事業所あたりの食品廃棄物の発生量は推定が必要であることが分かった。また、食品廃棄物を対象とした国内のメタン発酵システム約 100 件の事例を調査した結果、事業系食品廃棄物を事業所内でメタン発酵する場合の課題として、回収エネルギー以上にシステムの運転エネルギーが必要である場合があること、排水処理が必要であること、省スペース化が挙げられていた。一方、これらに対する具体的な解決策については明らかになっていないことが分かった。

第三章 小規模メタン発酵システムの高効率化対策に関する研究

食品廃棄物のメタン発酵システムを研究するにあたり、1 事業所あたりから発生する食品廃棄物量を理解することはメタン発酵システムの規模を決定するために必要である。本章では最初に、原単位法を用いて事業系食品廃棄物の発生量の推定を行った。その結果、事業所あたり 0.02~1 t/day 発生すると推定された。続いて、小規模メタン発酵システムのエネルギー収支を試算した。食品廃棄物 1 t/day 以下のシステムでは、自家消費電力がバイオガス発電によって得られる電力を上回り、余剰電力が得られないことが課題であることがわかった。この課題を解決するために 3 つの改善案を抽出し、メタン発酵システムへ適用した場合のエネルギー収支を試算した。その結果、メタン発酵槽への無動力型攪拌と送液機構を除いた一体化構造を採用したメタン発酵システムによって電力収支が改善され、余剰電力を生み出すことが可能性が示唆された。改善案の適用が実現したと仮定して、食品廃棄物重量あたりの温室効果ガス排出量を推定した。その結果、改善案を適用したメタン発酵システムは、集約型の焼却処理や堆肥化処理に比べて温室効果ガス発生量が少なく、集約型メタン発酵システムと同程度の温室効果ガス削減効果が得られると示唆された。

第四章 小規模食品廃棄物向け担体設置型無動力攪拌式メタン発酵槽の実験的研究

事業所内で食品廃棄物の効率的に収集し、破碎機能する手段として、ディスポーザーを有効活用できる可能性がある。第二章にて既往研究を調査した結果、ディスポーザーで生ごみを破碎処理する場合、生ごみは数倍から 20 倍程度の大量の水で希釈され、メタン発酵には適さない。そのため、希釈後に濃縮操作を行うことで基質 TS 濃度を 4% 程度まで高める手法の検討が行われていることが分かった。一方、基質 TS 濃度 4% は通常生ごみの湿式メタン発酵で適用される基質 TS 濃度 10% に比べて水分が多い。仮に、このような高希釈基質が無動力攪拌式メタン発酵槽に供給される場合、メタン発酵槽の構造上、攪拌回数の減少や汚泥流出によるメタン発酵槽内の菌体濃度低下などがメタン発酵の安定性に問題を生じさせることが懸念される。そこで、本章では小規模分散型のメタン発酵システムの確立に向けて、ディスポーザー処理後の濃縮された生ごみを想定した研究を行う。無動力攪拌機構および担体を組み合わせた新規メタン発酵槽を設計し、連続実験を通して性能を評価することを目的とした。TS 濃度 4% の模擬生ごみを基質として、COD_{Cr} 容積負荷 12 kg/m³/d までのバイオガスの発生状況と流出水の水質性状からメタン発酵の安定性を明らかにした。メタン生成菌の槽外流出を抑制する工夫としてメタン

発酵槽内に担体を設置した。生ごみをメタン発酵した既往研究の有機物除去率と比較することで担体の効果を評価した。また、メタン発酵槽の小型化が期待できるため、発酵温度を中温よりも容積負荷を高められる高温条件に設定し、本研究と同じ担体設置無動力攪拌式メタン発酵槽にて中温条件で運転した場合のメタンガス量との比較を行い、高温発酵の効果を確認した。

試験の結果、新規メタン発酵槽はCOD_{Cr}容積負荷 2.3~12 kg/m³/d の範囲で安定的に発酵できることが示された。9 日間の基質の供給停止後は段階的に負荷を上昇させることで安定的に運転を再開できることが示された。メタン発酵槽内の汚泥分布および攪拌回数の傾向から、メタン発酵槽内が定期的に攪拌され、混合された状態であることが示された。また、担体の設置により基質の有機物除去率が完全混合型メタン発酵槽に比べて向上することが示された。投入固形物あたりのメタン回収量は、COD_{Cr}容積負荷 6 kg/m³/d 以上では中温発酵よりも高温発酵の方が多く、高温条件ではメタン発酵槽の小型化が期待できることが示唆された。

以上より、新規メタン発酵槽はデスポーザー処理後の濃縮された食品廃棄物のような高希釈基質に適用可能であると結論づけた。

第五章 無動力攪拌式メタン発酵と排水処理を組み合わせたメタン発酵のパイロットプラントシステムの研究

メタン発酵の排水処理のために、排水処理設備の余力が不足している事業所や、排水処理設備そのものを持たない事業所があり、メタン発酵排水の処理を考慮する必要がある。デスポーザー排水を用いたメタン発酵システムの既往事例では、デスポーザー排水を固液分離する際に発生する上澄み液を排水処理部において発酵排水と同時に処理することで、排水処理部における残存する有機物、窒素やリン濃度の低減を図る手法が採用されている。本章では食品廃棄物のリサイクルに向けて、メタン発酵槽と排水処理を組み合わせた新規メタン発酵システムの研究を行う。パイロットプラントを構築し、処理性能を把握、低炭素効果化の推定することを目的とした。食堂の生ごみをデスポーザーにより破碎希釈したものを対象に連続試験を行った。メタン発酵槽には担体利用した無動力攪拌式メタン発酵槽を、排水処理槽には活性汚泥法を採用した。事業所内に排水処理設備を持たず厨房排水や雑排水が発生しない場合を想定し、メタン発酵排水を固液分離槽の上澄み液と混合液を排水処理の対象とし、流出水性状を下水道放流基準と比較した。その結果、担体設置型無動力攪拌式メタン発酵槽では安定的にバイオガスの回収が可能であった。また、排水処理では標準活性汚泥法を採用することによって、安定的に残存有機物が除去され、下水放流基準を満たす水質に近い流出水性状を達成することができた。

試験結果からスケールアップしたシステムのエネルギー収支を試算し、温室効果ガス削減効果を試算した。その結果、食品廃棄物 0.5 t/day 以上を対象としたシステムの場合、バイオガスから回収した熱エネルギーを活用することによって、一次エネルギー消費を削減可能であると試算された。また、食品廃棄物 0.25 t/day 以上を対象としたシステムでは、食品廃棄物を収集して焼却する場合に比べて温室効果ガスの削減量が大い、食品廃棄物 0.5 t/day 以上を対象としたシステムでは収集して堆肥化に比べて温室効果ガスの削減量が大いと試算された。

以上より，本研究にて提案した小規模分散型を想定したメタン発酵システムは従来システムではメタン発酵による利活用が困難であった少量の食品廃棄物の新たな活用方法として，有効な処理性能と低炭素化効果を有していることが示された．

第六章 結論と展望

本論文の結論と今後の展望をまとめた．

論文審査結果の要旨

本研究では、メタン発酵による食品廃棄物の再利用の促進に向けて小規模食品廃棄物に対応可能な新規メタン発酵システムを構築し、新たな食品廃棄物リサイクルシステムとしての有効性を示すことを目的に行われた研究である。本論文は以下の通り 6 章から構成されている。

第 1 章「緒論」では本研究の背景、研究の目的と意義を説明し、本論文の構成について述べた。

第 2 章「既往研究の調査と研究課題の整理」では、食品廃棄物のメタン発酵に関する既往研究およびメタン発酵システムの導入事例に関する既往研究について現状を総説し、研究課題を抽出した。

第 3 章「小規模メタン発酵システムの高効率化対策に関する研究」では、事業系食品廃棄物の事業所あたり発生量を 0.02～1 t/day と推定した上で、小規模メタン発酵システムのエネルギー収支を試算した。食品廃棄物 1 t/day 以下のシステムでは、自家消費電力がバイオガス発電によって得られる電力を上回り、余剰電力が得られない課題を示した。改善案として、メタン発酵槽への無動力型攪拌と送液機構を除いた一体化構造を採用したメタン発酵システムによって電力収支が改善され、余剰電力を生み出すせることを明らかにした。改善案を適用したメタン発酵システムは集約型の焼却処理や堆肥化処理に比べて食品廃棄物重量あたりの温室効果ガス発生量が少なく、集約型メタン発酵システムと同程度の温室効果ガス削減効果が得られることを明らかにした。

第 4 章「小規模食品廃棄物向け担体設置型無動力攪拌式メタン発酵槽の実験的研究」では、無動力攪拌機構および担体を組み合わせた新規メタン発酵槽を設計し、性能を評価した。TS 濃度約 4% の模擬生ごみを用い、発酵温度は高温 55℃ 条件下で連続処理を行った。CODCr 容積負荷 2.3～12 kg/m³/d の範囲で安定的に発酵できることが示した。メタン発酵槽内の汚泥分布および攪拌回数の傾向から、メタン発酵槽内が定期的に攪拌され、混合された状態であることを示した。また、担体の設置により基質の有機物除去率が完全混合型メタン発酵槽に比べて向上することが示した。新規メタン発酵槽はディスポーザー処理後の濃縮された食品廃棄物のような高希釈基質に適用可能であることを明らかにした。

第 5 章「無動力攪拌式メタン発酵と排水処理を組み合わせたメタン発酵のパイロットプラントシステムの研究」では、攪拌動力を低減したメタン発酵槽と活性汚泥による排水処理を組み合わせた新たなメタン発酵システムを構築し、システムの処理性能の評価と低炭素効果の推定を行った。食堂の生ごみをディスポーザーにて破碎した基質を連続処理した結果、担体設置型無動力攪拌式メタン発酵槽では安定的にバイオガスの回収が可能であった。また、排水処理では標準活性汚泥法を採用することによって安定的に残存有機物が除去され、下水放流基準を満たす水質に近い流出水性状を達成可能であることを示した。食品廃棄物 0.5 t/day 以上を対象としたシステムの場合、バイオガスから回収した熱エネルギーを活用することによって一次エネルギー消費を削減可能であると試算し、小規模メタン発酵システムによってエネルギー生産型のプロセスが実現することを明らかにした。

第 6 章では本研究を通して得られた結果を総括し、今後の展望について述べている。

以上、本論文は小規模分散型を想定したメタン発酵システムについて検討し、従来システムではメタン発酵による利活用が困難であった少量の食品廃棄物の新たな活用方法として有効な処理性能と低炭素化効果を有する新しい技術を開発し、重要な知見が得られているので、土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。