

| | | | |
|------------|----------------------------------|--------|--------------|
| | さかもと | まさる | |
| 氏名 | 坂本 | 勝 | |
| 授与学位 | 博士 | (工学) | |
| 学位授与年月日 | 平成17年 | 3月25日 | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則 | 第4条第1項 | |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科 | (博士課程) | 土木工学専攻 |
| 学位論文題目 | 好気性可溶化処理を組み込んだ生ごみの二相式メタン発酵に関する研究 | | |
| 指導教員 | 東北大学教授 | 野池 達也 | |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 | 野池 達也 | 東北大学教授 大村 達夫 |
| | | 東北大学教授 | 西村 修 |
| | | | 東北大学助教授 李 玉友 |

論文内容要旨

1. 研究の背景と目的

21世紀に入り、地球環境問題とりわけ二酸化炭素による地球温暖化現象が一段と顕在化している。化石燃料を消費し続ける限り大気中への二酸化炭素の蓄積は解消できず、化石資源からの脱却が必要な時期に来ているのは確かである。しかし、地球温暖化の抑制のために気候変動枠組条約が締結され、1997年に京都議定書がつけられたものの、具体的な対策が施されているとは考えられない。

二酸化炭素の排出抑制として有力な対策の一つとしてバイオマスの利活用が挙げられる。2002年1月、バイオマスは法律的に新エネルギーと認められ、これらを利用した研究開発も活発になり、今後ますます成果に期待が高まるものと予想されている。バイオマスのエネルギー利用には、有用資源として生産し利用するプランテーションバイオマスがあるが、食品系や畜産系の廃棄物を利用した廃棄物バイオマスには、廃棄物処理およびエネルギー利用の双方の観点からとくに注目されている。

廃棄物の排出状況(2001年度)は、一般廃棄物5,210万トン/年、産業廃棄物4億24万トン/年である。廃棄物の排出量は減少しているものの、平成時代に入りほぼ横ばい傾向が続いている。バブル崩壊後、低迷している経済状況であるが大量生産、大量消費、そして大量廃棄の流れは変わっていない。食品廃棄物の排出量(2000年度)は、家庭から排出される家庭系一般廃棄物1,241万トン/年、流通や商業段階等の事業系一般廃棄物552万トン/年、食品製造業等の産業廃棄物405万トン/年、合計2,198万トン/年である。食品廃棄物が廃棄物全体に占める割合は、産業廃棄物では約1%であるが、一般廃棄物では約34%と大きい。このような状況から、2001年5月に「食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律(食品リサイクル法)」が施行され、小売り、外食、食品加工メーカーなど食品を扱うすべての事業者を対象に、生ごみ等のリサイクル促進と排出削減が義務づけられるようになった。

食品廃棄物の処理技術には、排出源で使用する小規模な装置(コンポスト化など)から、大規模な食品製造業等のシステム(肥飼料化、燃料化などさまざま)まで幅広い試みがなされている。なかでも、食品廃棄物の処理にメタン発酵を導入した技術は、創エネルギーや疫学的安全性の観点から注目され、バイオマスの利活用という面からも、国内外ともに実用化に向けた研究開発が積極的におこなわれている。しかし、実用展開されているのは、旧厚生省の汚泥再生処理センター事業や食品製造業における大規模なシステムが多い。地球温暖化の抑制に貢献できるバイオマス利活用の推進や食品リサイクル法へ

の対応には、中規模以下かつ維持管理が容易なメタン発酵システムの構築が期待されている。

本研究では以上の背景を鑑み、好気性微生物による分解を利用した可溶化処理と二相式メタン発酵を組み合わせ、メタン発酵の分解過程を最適化した新システムを考案した。メタン発酵には高速リアクターである EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) 法を適用し、その処理水を下水道放流できる水質とし、後処理が必要なく、中規模以下かつ分散型として適用できるよう目標を定めた。従来研究の多くは模擬生ごみを使用しているが、本研究では実施設における適正な負荷の把握を目的として、組成や性状が変動する実際の廃棄物を用いて研究をおこなった。

2. 論文の構成

本論文は以下に示すとおり 7 章から構成されている。

第 1 章「序論」では本研究の背景および目的について述べた。

第 2 章「廃棄物系バイオマスのメタン発酵に関する従来研究」では、バイオマスの定義と分類、廃棄物系バイオマスの特徴を概説した。また、代表的な廃棄物系バイオマスである食品廃棄物のメタン発酵に関する研究課題を総説し、本研究の位置付けと目的を明確にした。

第 3 章「好気性可溶化処理を組み込んだ二相式メタン発酵の生ごみ処理特性」では、好気性微生物の分解を利用した可溶化処理と二相式メタン発酵を組み合わせた新システムに、食堂から排出された廃棄物を用い研究をおこなった。投入生ごみの負荷を変化させた連続運転の結果から、システムの処理特性を明らかにし、有用性を実証した。また、システムにおける問題点を課題として抽出した。

第 4 章「生ごみの二相式メタン発酵における油脂およびスカムの挙動特性」では、生ごみ等の食品廃棄物を処理する際に問題となる油脂やスカムに関して、第 3 章の研究から得られた知見に基づき、酸生成槽に蓄積する油脂やメタン発酵槽のスカムの性状を把握した。また、酸生成槽の温度を中温 (38℃) および高温 (55℃) に変化させ、酸生成槽における油脂の分解特性を評価した。

第 5 章「余剰汚泥のメタン発酵に及ぼす高分子凝集剤の影響」では、下水処理余剰汚泥を基質として、高分子凝集剤を注入した濃縮汚泥のメタン発酵に対する影響について回分実験をおこなった。

第 6 章「好気性可溶化処理を組み込んだ二相式メタン発酵のシステム最適化」では、第 3 章から第 4 章における新システムの研究開発により得られた知見に基づき、好気性可溶化処理の可溶化レベルの評価や二相式メタン発酵の効果を粒子径の計測や回分実験による分解特性、微生物の解析をおこない検討した。また、実用化を想定して本システムが安定した運転できるよう、酸生成汚泥の一部を引き抜き、メタン発酵槽 (EGSB) が最適な運転となるよう研究をおこなった。

第 7 章「総括および結論」では、本研究を通して得られた結果を総括し、本システムの最適なモデルケースを示した。さらに、今後の展望について述べた。

3. 本研究における主要な結果と結論

(1) 好気性可溶化処理を組み込んだ二相式メタン発酵は、負荷の増加に対して、メタン発酵槽 (EGSB) におけるメタンガス生成量が増加することがわかった。生ごみ溶解槽の容積負荷は 80~100kg・生ごみ/(m³・日)、酸生成槽は HRT=1.2 日、メタン発酵槽の容積負荷は、沈殿槽を設置しない場合、9kgCOD_{Cr}/(m³・日)の運転が適切であった。

(2) 酸生成槽の油脂蓄積量は、中温 (38℃) の運転において、投入生ごみ 1kg 当たり 27.3g (湿重量)、12g (エーテル可溶分)、投入生ごみ中の油脂の 40% (エーテル可溶分) であった。また、高温 (55℃) の運転では、投入生ごみ 1kg 当たり 15.0g (湿重量)、11.1g (エーテル可溶分)、投入生ごみ中の油脂

の37% (エーテル可溶分)であった。酸生成槽を高温にすることで、油脂の分解性は向上し、メタン発酵槽におけるメタンガス生成量は中温に比べて物質収支 (COD_{Cr}換算) 基準で13%増加した。

(3) メタン発酵槽のスカムの蓄積量は、投入生ごみ1kg当たり150~160g (湿重量)、5.0g (エーテル可溶分)であった。投入生ごみ中の油脂の17% (エーテル可溶分)であった。水分含有量が多く、主に生物分解が困難な飽和脂肪酸によって形成されることがわかった。

(4) 酸生成槽の蓄積油脂の性状や脂肪酸組成は、投入生ごみの種類によって異なり食品素材の油脂に類似し、植物性油脂や動物性油脂 (肉類、魚介類) の特徴を有することがわかった。

(5) 回分実験により余剰汚泥を基質としたメタン発酵に対する高分子凝集剤 (カチオン性ポリマー) の影響は、投入汚泥TS当たり1%以下でのポリマー注入率では阻害を及ぼさない。阻害は、投入汚泥TS当たり3%以上で生じ、同じ薬注率ではカチオン度の高い凝集剤による阻害が大きい。実施設においては、微生物の馴化が進むため、阻害作用はないといえる。薬注率の増加による阻害の原因は、凝集状態や粘性に起因するのではなく、ポリマーの有するカチオン性による細菌活性への作用が大きい。

(6) 生ごみ溶解槽の可溶化レベルは、物理的な破碎 (市販の高速ブレンダー) の限界値とほぼ等しく、累積値 (体積基準) 10%、50%、90%における粒子径は、それぞれ11 μ m、86 μ m、211 μ mであった。また、余剰活性汚泥の超音波処理とも同等であり、可溶化レベルが高いことが示された。生ごみ溶解槽は、散水、低速攪拌および微生物分解を利用した簡易なプロセスであることから、他の可溶化技術と比較して、実施設におけるスケールアップや運転および維持管理の面で有利であることが示された。

(7) 生ごみ溶解液と酸生成液のメタン発酵特性を回分実験により比較した結果から、酸生成液の方がバイオガスおよびメタンガス生成量ともに多く、バイオガス中のメタンガス割合も大きかった。本システムの場合、単相式より二相式メタン発酵を適用する方が効率が高かった。また、生ごみ溶解槽と酸生成槽の細菌相は異なり、各槽の機能分離が成立し、これらの槽の細菌間で共同代謝していることが確認された。

(8) メタン発酵槽における固形性物質の蓄積を考慮し、沈殿槽を設ける場合を想定した運転では、沈殿槽からの引き抜き汚泥量は1.5L/kg-生ごみ、そのうち0.3L/kg-生ごみを生ごみ溶解槽に返送する運転が効果的であることがわかった。下水排除基準を満たすメタン発酵槽の最大負荷は9.4kgCOD_{Cr}/(m³・日)であった。

これらの結果から得られた設計諸元値をもとに、本システムの一般的なモデルを構築すると図1に示すとおりになる。処理方式、投入生ごみの性状および含水率の違いにより、一律な評価は困難であるが、概ね中温域の単相式メタン発酵法では、固形物濃度が6~10%の場合、HRT=15~30日と考えられる。図に示すとおり、食品廃棄物1ton/日进行处理する施設で試算すると、本システムでは、生ごみ溶解槽10m³、酸生成槽12.9m³、メタン発酵槽 (EGSB) 28.4m³、合計51.3m³となる。一方、単相式メタン発酵法では、固形物濃度7% (水量: 1,000kg/日 \times 0.75 \div 0.07=3,571kg/日=3.57m³として計算。), HRT=20日で運転すると、71.4m³の反応槽となる。受入槽や調整槽が必要な場合、さらに容積は大きくなる。また、単相式では、ほぼ全量である3.57m³/日が汚泥として排出され、後続に脱水処理や脱離液の返流水対策が必要であるのに対し、本システムでは処理水が下水道放流可能であり、汚泥排出量は1.29m³/日である。単相式と比較して、槽容量で28%の省スペース、汚泥量で64%の削減ができる。施設規模および汚泥処理の点で非常に有利であることがわかった。維持管理については、生ごみ溶解槽の定期的な余剰生ごみや担体の引き抜きがないこと、実際の廃棄物を使用した負荷の増加に対する処理水の安定性、施設の簡易化が可能であることから、特に小・中規模施設への適用が有効である。本研究では新規

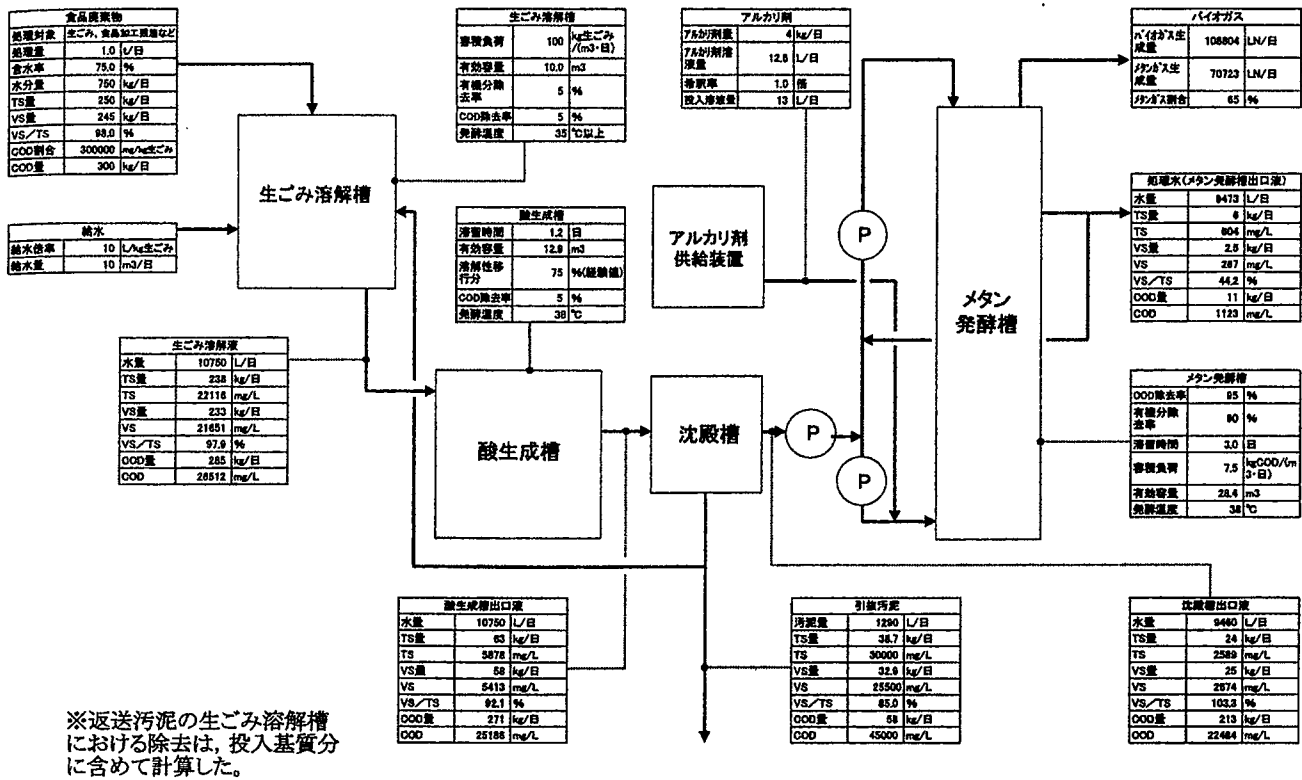


図1 本システムの一般モデル(処理量1ton/日)

システムを実証し、その有用性を明らかにした。

今後の展望として、本研究では分子生物学的手法を用いて微生物の解析をおこなっているが、さらなる効率化という点では、処理に関与している微生物の詳細な知見を得ることが必要である。また、生ごみ溶解槽は食品廃棄物のメタン発酵における前処理として適用性の高さが証明されたことから、下水処理施設の汚泥やスカム、し尿、畜産廃棄物などと共発酵 (co-digestion) する場合にも応用することができる。これらの期待に応ずるべく、さらに研究に取り組んでいきたいと考える。

論文審査結果の要旨

食品廃棄物の処理にメタン発酵を導入した処理技術は、エネルギー回収や疫学的安全性およびバイオマスの利活用の観点から、実用化に向けた開発研究が国の内外で積極的に行われている。本論文は、好気性微生物を利用した可溶化処理と、二相式メタン発酵を組み合わせた新しいシステムの開発を行ったもので、全編7章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景・目的について述べている。

第2章では、廃棄物バイオマスである生ごみ等の食品廃棄物のメタン発酵に関する従来の研究について文献調査を行い、研究課題の整理を行っている。

第3章では、食堂から排出される実際の廃棄物を用いて、好気性微生物を利用した可溶化処理と二相式メタン発酵を組み込んだ新しい処理システムの実験を行い、従来の単相式メタン発酵プロセスと比較して、施設規模および維持管理に関して有利であり、有機物負荷の増大に対しては、メタン発酵槽(EGSB)におけるバイオガス発生量が増大する。生ごみ溶解槽の容積負荷は、80~100kg 生ごみ/m³d、食堂から排出される実際の廃棄物を用いた酸生成槽では HRT=1.2d、メタン発酵槽の容積負荷は、沈殿槽を設置しない場合、9kgCOD/m³d の負荷が適切であることを明らかにした。これらは有用な知見である。

第4章では、生ごみ等の食品廃棄物を処理する際に問題となる油脂やスカムについて、酸生成槽に蓄積する油脂およびメタン発酵槽のスカムの性状を明らかにし、酸生成槽の温度を中温(38℃)および高温(55℃)に変化させた場合、油脂の分解率は、高温において増大し、それに伴い、バイオガス発生量も増大する結果を得ている。これらも有用な知見である。

第5章では、余剰活性汚泥を基質として、高分子凝集剤(カチオン性ポリマー)を注入した濃縮汚泥のメタン発酵に対する影響について、回分実験によって検討し、メタン発酵に対する阻害は投入汚泥TS当たり3%以上の薬注率で生じ、実際の処理施設では薬注による影響はないこと、さらに、高濃度薬注時における阻害の原因は、ポリマーのカチオン性による細菌活性への作用であることを明らかにしている。これは新しい知見である。

第6章では、第3章から第4章までに得られた好気性可溶化処理の可溶化レベルの評価や二相式メタン発酵の効果を検討し、実用化を想定した本システムの安定的な運転方法について検討している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、実際の食品廃棄物を用いて、好気性微生物を利用した可溶化処理と、二相式メタン発酵を組み合わせた新しい処理システムの開発を行ったもので、環境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。