

学位論文題名

Study on characteristics of fermentation of waste biomass by dry-type methane fermentation method

(乾式メタン発酵法によるバイオマス系廃棄物の発酵特性に関する研究)

学位論文内容の要旨

メタン発酵には 37℃程度の中温発酵と 52℃程度の高温発酵があり、また全固形物濃度(TS 濃度)の多少によって湿式と乾式の2種類がある。湿式メタン発酵は発酵槽内物の TS 濃度が約 10% 以下の液状であり、乾式メタン発酵は、TS 濃度が約 15~45%と高い濃度である。乾式メタン発酵残渣は低水分のために、固形堆肥、ペレット燃料や炭化の原料などにすることができる。この結果、乾式メタン発酵技術は総合的にみて固形バイオマス系廃棄物のエネルギー回収として非常に効率が高くなり、また廃水処理工程が不要にもなる。乾式メタン発酵法にとって都市ごみ(生ごみ、紙ごみ)、家畜ふんなどバイオマス系廃棄物の潜在的なバイオガス発生量やメタン濃度、分解速度、分解率などを事前に知ることは発酵槽の設計のみならず、実際にメタン発酵処理するときの状態を判断する資料を与えることになる。本研究は乾式メタン発酵によるバイオマス系廃棄物のバイオガス発生量、メタン濃度、有機物分解速度、分解率など「バイオマス系廃棄物の生物分解性」を解明し、メタン発酵槽の設計や発酵槽運転に資する資料を得ることを目的として行ったものである。

1. 回分式試験による家畜ふんと生ごみ、紙ごみの乾式メタン発酵特性

高温乾式メタン発酵(52℃)におけるバイオマス系廃棄物の発酵特性を家畜ふん、生ごみ、紙ごみおよび剪定枝を使用して検証した。その結果、回分式高温乾式メタン発酵試験では、一般的に、バイオマス系廃棄物を完全に分解するには、およそ7日かかることがわかった。これらから発生したバイオガス中のメタン濃度は、51~61%の範囲であったが、バイオガスの発生量は 0.26~0.63NL/g-VS と原料によって大きく変動した。さらに、投入材料中の生物分解可能な有機物(BOM)量を簡単に計算するために、セルロースを標準有機物として用いる評価方法(セルロース法)を検討した。1kgVS のセルロースから 415NL のメタンガスが生成される。この値を元に、廃棄物からのメタンガス発生量から、例えば、生ごみの BOM 92%、新聞紙系古紙の BOM 33%と算出できた。この方法は、一般的に行われている発酵前後の有機物(VS)差から計算する mass balance 法と比較して、紙などセルロース比率の高いバイオマスの BOM を簡単に計算することができた。

2. 乾式メタン発酵残渣のTS濃度に影響する因子

乾式メタン発酵は発酵槽内の TS 濃度を 15%以上に維持することが発酵を順調に行う上で重要である。投入材料の分解特性を知り、投入割合を適切に設定しなければ、発酵後の TS 濃度は 15%以下に低下し発酵に支障をきたす。したがって、乾式メタン発酵を行うに当たっては発酵残渣の TS 濃度に影響する因子と発酵残渣の TS 濃度との相関を明らかにすることが必要である。現行法では発酵残渣の TS 濃度に影響を与える因子として BOM や強熱減量が考慮されているが、その

他に蒸発や加水分解水により損失する水の量も TS 濃度に影響を与えると考えられる。そこで、生ごみと紙ごみの二つの性状の異なる投入材料を用い、水の損失を考慮した場合を現行法と比較することで、蒸発水分量と加水分解水利用量が発酵残渣の TS 濃度に与える影響を求めた。その結果、蒸発水分量と加水分解水利用量は BOM や強熱減量よりも影響が非常に小さく、両方法にほとんど差が無かった。よってメタン発酵残渣の TS 濃度の予測には、現行法の要素から予測することが十分可能であることが明らかとなった。

3. 家畜ふんと生ごみ、紙ごみの中温乾式メタン共発酵

乾式メタン発酵は高い TS 濃度で運転できるため、発酵材料を加熱するためのエネルギーが小さい。高温発酵は固形物の可溶化が促進され、分解速度を速めることができるため、一般に乾式メタン発酵では高温発酵で運転される。しかし、家畜ふんは窒素濃度が高く湿式メタン発酵においては、高温発酵で高アンモニア態窒素濃度による阻害を受けやすい。一方中温湿式メタン発酵は、高アンモニア態窒素濃度に対して耐性がある。そこで、本実験では中温乾式メタン発酵によって生ごみ、紙ごみを主体として、これに家畜ふんを混合させた場合の基礎発酵特性、特に投入負荷量とバイオガス発生量の関係および投入限界負荷量を求めた。その結果、ガス収率は $0.3\text{NL/g-VS}_{\text{added}}$ であり、投入限界負荷は $7\text{ gVS/kg-sludge}\cdot\text{day}$ であることが明らかとなった。これは中温湿式メタン発酵の限界負荷 $3.5\text{ gVS/kg-sludge}\cdot\text{day}$ と比較して 2 倍の負荷耐性があることになる。また、ガス発生量 ($y:\text{NL/kg-sludge}$) と有機物負荷 ($x:\text{gVS/kg-sludge}\cdot\text{day}$) の関係は $y=0.3x$ であった。これらの結果から、中温乾式メタン発酵は家畜ふんと生ごみ、紙ごみの共発酵には有効な手段となることを確認した。

4. 高温乾式メタン共発酵による生分解性プラスチックの分解特性

生分解性プラスチックの分解特性を明らかにするために、生分解性プラスチックを生ごみ、紙ごみと混合して実験を行った。使用した PLA 系生分解性製プラスチック(以下 PLA と略す)はごみ袋、青果袋とコップである。回分式実験からこれら PLA 中の生分解可能物が完全に分解されるのに 7 週間要することが明らかとなった。また、ごみ袋、青果袋とコップの分解率はそれぞれ 37%、80%と 52%であった。三種類の PLA のバイオガス発生量はそれぞれ、0.396、0.394、0.401NL/g-BOM であり、メタン濃度は 53%、53%、54%であった。さらに、C/N 比と PLA の投入量を変えて連続実験を行った。連続実験は、生ごみ、紙ごみのみを投入材料とした実験区(C/N 比:25)を基準とし、PLA の投入量を変えて PLA の分解率を求めた。発生したバイオガス中のメタン濃度は 52~55%であり、PLA からのメタン発生量は $0.064\sim0.170\text{NL-CH}_4/\text{kg-sludge}\cdot\text{day}$ であった。PLA2%投入区での PLA 分解率は、C/N 比 25・18 の場合それぞれ 49%・61%であった。これより、C/N 比が低い条件の方が PLA の分解を促進する傾向があることが明らかとなった。

本研究では、主に高温乾式メタン法によるバイオマス系廃棄物の生物分解性を検討した。乾式メタン発酵の限界有機物負荷は湿式メタン発酵の 2 倍以上になることが明らかとなった。本研究では安定した乾式メタン発酵を維持する負荷、有機物分解率、ガス収率、特に BOM の重要性を明らかにした。乾式メタン発酵は紙ごみを含む種々のバイオマス系廃棄物の共発酵に有効な手段となることを確認した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 松 田 從 三
副 査 教 授 木 村 俊 範
副 査 准教授 近江谷 和 彦

学 位 論 文 題 名

Study on characteristics of fermentation of waste biomass by dry-type methane fermentation method

(乾式メタン発酵法によるバイオマス系廃棄物の発酵特性に関する研究)

本論文は、全6章からなる総頁数130の英文論文である。論文には図35、表23、引用文献61が含まれ、別に1編の参考論文が添えられている。

メタン発酵は、多種類のバイオマス系廃棄物を分解処理することができ、発酵に伴い約60%のメタンガスを含むバイオガスを発生しエネルギーとして利用することができる方法である。乾式メタン発酵は槽内のTS濃度が約15~45%で、発酵残渣は粘土状であるため、堆肥化・炭化などに再利用することができる。そのため、乾式メタン発酵は固形バイオマス系廃棄物の効果的な処理方法の一つと考えられる。しかし、乾式メタン発酵は、日本では初めての実用プラントが建設を開始したばかりでまだその研究例が少なく、発酵槽の設計や発酵条件を設定するための、基礎的なデータが不足している。本研究は乾式メタン発酵による生ごみ、紙ごみなどバイオマス系廃棄物のバイオガス発生量や分解率など「バイオマス系廃棄物の生物分解特性」を解明することを目的として行ったものである。

1. 回分式試験による家畜ふんと生ごみ、紙ごみの乾式メタン発酵特性

家畜ふん、生ごみ、紙ごみなどを用いて、高温乾式メタン発酵(52℃)における発酵特性を検証した。その結果、高温乾式メタン発酵法では、バイオマス系廃棄物を完全に分解するのに約7日間かかった。これら廃棄物から発生したバイオガスの発生量は0.26~0.63NL/g-VSであり、バイオガス中のメタン濃度は、51~61%の範囲であった。さらに、投入材料中の生物分解可能な有機物(BOM)量を簡単に計算するために、セルロースを標準有機物として用いる評価方法(セルロース法)を検討した。セルロース法で計算すると、生ごみのBOMは92%、新聞紙系古紙のBOMは33%であった。この方法では、一般的に行われている発酵前後の有機物質量差から計算するmass balance法と比較して、紙などセルロース比率の高いバイオマスのBOMを簡単に計算することができることがわかった。

2. 乾式メタン発酵残渣のTS濃度に影響する因子

乾式メタン発酵では、発酵槽内を適正なTS濃度に維持することが重要である。投入材料の分解特性を知り、その投入割合を適切に設定することで、発酵槽内のTS濃度を適正に維持することができる。したがって、良好な乾式メタン発酵を行うために、発酵残渣のTS濃度に影響する因子とその影響程度を明らかにする必要がある。現行法では因子としてBOMや強熱減量が考慮されてい

るが、その他に蒸発や加水分解水により損失する水の量も TS 濃度に影響を与えると考えられる。そこで、生ごみと紙ごみを用いて、水の損失を考慮した場合と現行法とを比較した。その結果、蒸発水分量と加水分解水利用量は BOM や強熱減量よりもメタン発酵残渣の TS 濃度に及ぼす影響が小さく、両方法にほとんど差が無かった。よってこの発酵残渣の TS 濃度は、現行法の因子から予測することが十分可能であることが明らかとなった。

3. 家畜ふんと生ごみ、紙ごみの中温乾式メタン共発酵

一般に乾式メタン発酵では高温発酵で運転される。湿式メタン発酵において窒素濃度の高い家畜ふんは、高温発酵では高アンモニア態窒素濃度による阻害を受けやすく、中温発酵では高アンモニア態窒素濃度に対して耐性がある。本研究は家畜ふんを生ごみ、紙ごみと混合して発酵させた場合の中温乾式メタン発酵による基礎発酵特性、特にガス収率及び投入限界負荷量を求めることを目的とした。その結果、ガス収率は $0.3\text{NL/g-VS}_{\text{added}}$ で、投入限界負荷は $7\text{ gVS/kg-sludge}\cdot\text{day}$ であることが明らかとなった。これは中温湿式メタン発酵の限界負荷 $3.5\text{ gVS/kg-sludge}\cdot\text{day}$ の 2 倍の負荷耐性であった。これらの結果から、中温乾式メタン発酵は家畜ふんと生ごみ、紙ごみの共発酵には有効な手段となることを確認した。

4. 高温乾式メタン共発酵による生分解性プラスチックの分解特性

生分解性プラスチックの分解特性を明らかにするために、PLA 系生分解性プラスチック(以下、PLA)を生ごみ、紙ごみと混合して実験を行った。回分式実験により、これら PLA 中の生分解可能物が完全に分解されるのに約 7 週間かかり、PLA からの平均バイオガス発生量は 0.397NL/g-BOM で、メタン濃度は約 53%であることが明らかになった。さらに、C/N 比と PLA の投入量を変えて連続実験を行った結果、PLA の投入によりガス量の増加がみられ、PLA のガス化が確認された。PLA2%投入区での PLA 分解率は、C/N 比 25 と 18 で、それぞれ、49%と 61%であった。これより、C/N 比が低い条件の方がアンモニア態窒素が多く、pH も高く、PLA の分解が促進した。

本研究では、主に高温乾式メタン法によるバイオマス系廃棄物の生物分解性を検討し、安定した乾式メタン発酵を維持する負荷、有機物分解率、ガス収率を求め、特に BOM の重要性を明らかにした。本研究の結果は、紙ごみを含む種々のバイオマス系廃棄物の乾式メタン共発酵において、今後のメタン発酵槽の設計や運転条件を設定するための基礎的データとなるものであり、学術的にも高く評価できる。

よって、審査員一同は、肖冬生が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。