



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Studies on pretreatment and process stabilization in anaerobic digestion [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	那, 日蘇
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第15758号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91983
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Na_Risu_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 那 日 蘇

Studies on pretreatment and process stabilization in anaerobic digestion (メタン発酵における前処理とプロセス安定化に関する研究)

嫌気性消化（AD）技術は、リグノセルロース系バイオマスや都市ごみなど、ほぼすべての有機物から生分解性成分をバイオガスに変換する。そのため、廃棄物処理とエネルギー回収を同時に実現することができる。バイオエコシステムにおける AD 技術には変換効率の向上およびプロセスの安定性に関する課題が残されている。

トウモロコシ茎葉（CS）は、その高い生産性と高い窒素吸収能力を備えている。中国では収量 10 億トンのうち 5 億トンが未利用のまま残されていることから、これを研究対象として取り上げた。再生可能エネルギー利用のための持続可能な CS 生産は、CS を原料として最大限に利用するための生産方法だけでなく、耕うんシステムが化石燃料からの CO₂排出の削減にどのように貢献するかを明らかにすることが不可欠である。

CS は複雑なネットワーク構造を有し、セルロースやヘミセルロースはリグニンによって強固に包まれており、可溶化や生分解が困難である。この複雑で硬い構造がリグノセルロース系バイオマスの酵素消化性を制限することから、炭水化物構造全体の分解を阻害する。生ごみや紙ごみを原料にする AD では、生ごみ中の易分解性成分が揮発性脂肪酸（VFA）に急速に変換されることにより pH が低下し、最適な AD 環境条件から外れるとプロセスの安定性や性能に影響する。これらの問題を解決するために、本研究は、(1) CS 生産の耕うんシステムの最適化のため、4 つの耕うん方式を用いてトウモロコシの地上部バイオマス収量と燃料消費に伴う CO₂排出量を調査し、(2) 生ごみと廃棄紙を用いた AD における消化液の固形物濃度一定化による AD プロセスの安定化を検討する、さらに、(3) バイオメタン生成のための CO₂アシスト水熱前処理による CS の分解性向上の効果を明らかにする。これらを目的として実施し、結果を取りまとめたものである。

1. CS 生産のための耕うんシステムの最適化

この章では、慣行耕うん（CT）、2 つの省力的耕うん（ROT と CR）、およびコントロール（CON）を含む 4 つの耕うんシステムのディーゼル燃料による CO₂排出量とバイオマス収量を調査した。ディーゼル燃料消費量に由来する CO₂ 排出量は、CT, ROT, CR, CON の各システムでそれぞれ 165.0, 153.8, 105.8, 94.6 kg/ha となった。バイオマス収量については、2 か年の試験を実施し、表土鎮圧工程を含む CT と CR は他のシステムと比較して、2019 年に 26.8、23.5 t/ha、2020 年に 29.4、27.8 t/ha といずれも比較的高い収量が得られた。以上の結果から、播種後の鎮圧工程は発芽率（GR）に影響を与えることが明らかになり、省力的なシステムのメリットを十分に発揮するには、発芽率を向上させる表土鎮圧工程の適応が必要であることがわかった。プラウ耕、播種、鎮圧工程からなる省力的耕うんシステム（CR）は、慣行耕

うんシステム (CT) と比べて、CS 組成のうち約 8.7%の揮発性固形物の損失を伴い、35.8 %の CO₂排出量の削減に貢献した。

2. 固形物濃度一定化による AD プロセスの安定化

メタン発酵中の全固形分 (TS) がプロセスの安定性や性能に大きな影響を与える。そこで、AD 発酵中の消化液の TS を一定に維持する物質収支式から基質投入量を求め、AD 発酵試験を実施する方法を開発した。同法により生ごみ、紙ごみ、水、及び返送消化液の投入量を算出して、2つの水準の消化液固形物濃度 (4% w.b. および 6% w.b. の制御目標値) で 64 日間 (Phase 1, ~29 日: 目標 4%、Phase 2, 3, 29~50 日、Phase 4, 50~64 日: 目標 6%) の実験を行い、安定化を行わない AD 発酵を比較対象とした。メタンガス発生量を投入原料の有機物の質量で除した値である Specific Methane Yield (SMY) を発酵プロセスの評価指標として用いた。半連続反応器 (235 L) を用いて高温条件 (53 ± 2 °C) 下で試験を行い、物質収支式に基づく操作条件を適用することで、消化液中の TS 含量を目的の水準から 1% w.b. 以内に維持できた。このことから新たに考案した方法を採用することで消化液 TS 含量は目標水準で推移し、消化プロセスを安定させられることが明らかになった。また、4% w.b. 水準 (SMY: 0.36 n-m³/kg VS, 有機物分解率: 79.6%) では、バイオガス生産量の増分: 10.2%、メタン濃度の増分: 13.5%、それぞれ比較対象の AD 発酵水準より増加し、6% w.b. 水準 (SMY: 0.31 n-m³/kg VS, 有機物分解率: 70%) では、16.6%と 21.2% 増加した。以上の結果から、AD 発酵において投入基質の種類や量の操作により消化液 TS を制御することで、高水準のバイオメタン生成や有機物分解が維持されるものと考えられる。

3. バイオメタン生成のための CS の CO₂アシスト水熱前処理

CS の水熱前処理 (HTP) において、CO₂添加の効果を検討した。CS の HTP は、耐圧反応容器 (190 mL) を供試し、2つの CO₂圧力条件: 3、5 MPa および従来のコントロール (CO₂フリー)、温度範囲: 50, 70, 90 °C の 3 水準で、CS 試料を調製した。これらを供給して、AD 試験 (計 20 条件) を実施した。CO₂アシスト HTP による CS のヘミセルロースは 24~30%であり、未処理の CS (32%) と比べて低下した。さらに、走査型電子顕微鏡観察から前処理基質の細孔面積と多孔性の増大が認められた。この CS 基質の微細構造の変化がリグノセルロースへの嫌気性消化細菌や酵素の吸着を助け、AD 過程における CS の炭水化物の生物反応変換が加速されるものと考えられる。AD 試験について、未処理 CS では、SMY: 0.13 n-m³/kg VS, 有機物分解率: 32%、CO₂アシスト水熱前処理による CS では、SMY: 0.21 n-m³/kg VS, 有機物分解率: 40%であった。以上の結果から、CO₂アシスト水熱前処理による CS を基質として供給すると AD 発酵においてバイオメタン生成や有機物分解率を向上させることを明らかにした。

本研究では、耕うんシステムについて、省力的耕うんは、慣行耕うんと比較して、収穫される CS の組成のうち揮発性固形物等の損失を伴うが、CO₂排出量の削減に貢献すること、新たに考案した AD 発酵方法においては高水準のバイオメタン生成や有機物分解が維持され、さらに CO₂アシスト水熱前処理による CS の AD プロセスにおける分解性向上の効果を明らかにした。以上の知見は持続可能なバイオエコシステムを支えるものと結論づけられる。