

共同研究報告書
整理番号 第421号

家畜ふん尿と稲ホールクロップの 共メタン発酵技術の開発

共同研究報告書

平成23年3月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人北海道大学

Copyright © (2011) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

家畜ふん尿と稲ホールクロップの 共メタン発酵技術の開発

共同研究報告書

独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所

寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム 上席研究員 横濱 充宏

主任研究員 石田 哲也

国立大学法人北海道大学大学院

農学研究院生物生産工学分野農業循環工学研究室 教授 近江谷和彦

院生 相川 一馬

要旨

【目的】難分解性有機物のセルロース含有量が多い、稲わらの湿式メタン発酵での資材適性を検証するとともに、バイオエタノール化との創出エネルギー比較を行い、バイオマス資源としての稲わらの有効利用を構築する。【方法】家畜ふん尿を主原料としたメタン発酵室内実験装置に、稲わらには前処理として、サイレージ化、細断と粉砕、メタン発酵消化液に浸漬して高温処理する可溶化処理を組み合わせ実施し、副資材として投入した。メタンガス発生量を主たる指標としてメタン発酵の良否を判定した。【結論】サイレージ化と粉砕と可溶化処理を複合して前処理した稲わらのメタンガス発生量が最大となり、無処理に比べ約1.3倍となった。生産されたメタンガスのエネルギー量は、バイオエタノール製造実証実験で得られた取得可能熱量と比較すると、単位原料重量あたりで約2.8倍の熱量であった。稲わらは家畜の残食サイレージであっても、メタン発酵の良質な副資材として利用できるが、分解性を高めるために、粉砕等の前処理が必要である。

キーワード：メタン発酵、共発酵、稲わらサイレージ

目 次

第1章 緒論

1.1	日本の水田の現状と多面的機能	1
1.2	稲わらでエネルギー生産を	1
1.3	バイオエタノール化	2
1.4	バイオガス化—メタン発酵	2
1.5	稲わらを副資材としたメタン発酵に関する既往の研究	5
1.6	本研究の目的	5

第2章 稲わらサイレージの投入形態に対する

家畜ふん尿のメタン発酵特性

2.1	はじめに	5
2.2	実験方法	6
2.2.1	実験装置	6
2.2.2	供試材料	6
2.2.3	実験条件	7
2.2.4	測定項目	9
2.2.5	試験区の設定	10
2.3	結果と考察	11
2.3.1	わらに対する処理効果	11
2.3.2	もみに対する処理効果	13
2.4	まとめ	14

第3章 稲わらサイレージに対する超高温消化液可溶化処理及び

粉碎効果が家畜ふん尿メタン発酵に与える影響

3.1	はじめに	15
3.2	実験方法	15
3.2.1	実験装置	15
3.2.2	供試材料	16
3.2.3	実験条件	16
3.2.4	測定項目	17
3.2.5	投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量	18
3.3	結果と考察	18
3.3.1	解析期間	18
3.3.2	発酵容積あたりメタンガス発生量	18
3.3.3	投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量	19
3.3.4	有機物分解率	22
3.3.5	揮発性脂肪酸 (VFA)	23
3.3.6	アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	24
3.3.7	pH	24
3.4	まとめ	25

第4章 スカムの発生量がメタン発酵に与える影響

4.1	はじめに	25
4.2	実験方法	25

4.2.1	スカムの破砕	25
4.2.2	実験方法の詳細	27
4.3	結果と考察	27
4.3.1	スカムの厚さ	27
4.3.2	発酵容積あたりメタンガス発生量	28
4.3.3	稲わら由来発酵容積あたり累積メタンガス発生量	30
4.3.4	揮発性脂肪酸 (VFA)	32
4.3.5	アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	33
4.3.6	pH	34
4.4	まとめ	34

第5章 稲わらのバイオガス化とバイオエタノール化の熱量比較

5.1	はじめに	35
5.2	比較方法	35
5.2.1	規模の比較	35
5.2.2	熱量比較の範囲	36
5.2.3	メタンガスの発生熱量算出方法	37
5.2.4	エタノールの発生熱量算出方法	38
5.3	結果と考察	38
5.3.1	本研究とバイオエタノール製造実証施設の規模比較	38
5.3.2	発生熱量比較	39
5.4	まとめ	39

第6章 総括

6.1	本研究の目的	40
6.2	稲わらサイレージの投入形態に対する家畜ふん尿のメタン発酵特性 (第2章要約)	40
6.3	稲わらサイレージに対する超高温消化液可溶化処理及び 粉碎処理が家畜ふん尿メタン発酵に与える影響 (第3章要約)	40
6.4	スカムの発生量がメタン発酵に与える影響 (第4章要約)	42
6.5	稲わらのバイオガス化とバイオエタノール化の熱量比較 (第5章要約)	42
6.6	本研究の結論と今後の課題	43

参考文献	44
------	----

第1章 緒論

1.1 日本の水田の現状と多面的機能

日本の水田面積は、米の生産調整、日本人の食生活の変化に伴う米の消費減少、高齢化や若者の離農などの原因から減少傾向にあり、耕作放棄地も年々増加している。図 1-1 に日本の水田面積の推移を示した。水田の減少面積は少なくなる傾向にはあるが、減少していることにはかわりはない。したがって、水田面積そのものも減少傾向に歯止めがかかっていない。

しかし、水田は米の生産以外にも、家畜飼料やエネルギーの生産、景観の保全などの役割を果たし、水田機能を保っておくことによって、有事の際には食糧安全保障の役割を果たすことが期待されている。

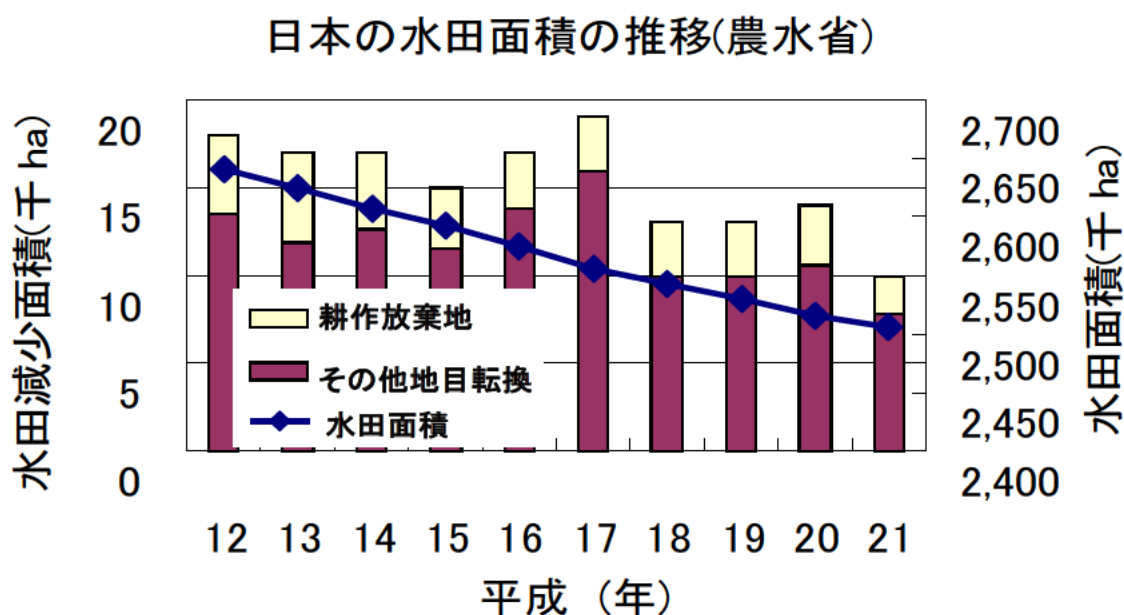


図 1-1 日本の水田面積の推移 (農水省調べ 2009)

水田を保全することの意義は上述のとおりであるが、一方で、全国各地で食料用に行われている稲作の副産物として年間約900万トン生産される稲わらの処理が昨今では問題となっている。現在の米の収穫作業体系上、稲わらは水田圃場に残されてしまう。そのため、水田農家の稲わらの処理は焼却または鋤込みの処理が一般的であった。

しかし、稲刈りの時期は一年の内でも放射冷却などにより、稲わら等の焼却によるばい煙が上空に拡散しにくい状態となり、周辺的生活環境に影響が出やすくなる。稲わらが大量に焼却されると、大量のばい煙によって列車が止まるなど交通機関に大きな影響を与えているという報告(秋田、2008)もあり、稲わらの焼却を条例によって禁止している地域も存在する。

また、稲わらを鋤込むことによって、水田からのメタンガス発生量が増加するといわれている。メタンガスは温室効果ガスであり、地球温暖化防止の観点から鋤込みではなく、収集し有機質肥料へ変換し、還元することが推進されている(農林水産省、2008)。

1.2 稲わらでエネルギー生産を

水田が十分に利用されずに耕作放棄地が増加していることや、稲作の際に大量に生産さ

れる稲わらの処理が課題となっている現状について前節で述べたが、これらの現状を踏まえて、近年、稲や稲わらを用いたエネルギー生産の試みに注目が集まっており、京都議定書の発効やバイオマス利用の進捗状況等の新たな情勢変化を踏まえて、関係省庁の下で、平成18年3月に新たなバイオマス・ニッポン総合戦略が閣議決定された。

新たなバイオマス・ニッポン総合戦略では、バイオマスエネルギーの導入、未利用バイオマス利用の促進、バイオマスタウン構想の加速化が具体的な目標として掲げられている。特に、未利用セルロース系バイオマスの利用においては、稲わらのエネルギー化が注目されている。

近年の諸外国におけるバイオ燃料の生産においては、トウモロコシや小麦などのバイオエタノール化が盛んに行われているが、食糧と競合する原料を用いていることによって食糧の価格が高騰するという問題を生じせしめている。その点、稲わらを原料としたエネルギー生産は食糧と競合しないため、大きなメリットであると言える。

1.3 バイオエタノール化

稲わらを始めとした生物起源であるバイオマスを燃料化したものをバイオ燃料と呼ぶが、バイオマスからバイオ燃料を製造する技術には、メタン発酵、エステル化、エタノール発酵、熱分解ガス化、ガス合成、水素化精製、炭化、固形燃料化の8種類がある。その結果得られるのはバイオガス、バイオディーゼル、バイオエタノール、燃料ガス、BTL(Biomass To Liquids)、エコ燃料、炭、木質固形燃料などの8種類のバイオ燃料である(環境省、2008)。

世界的にすでに実用化されているバイオ燃料は、バイオエタノール、バイオディーゼル、バイオガスであり、ディーゼル車両が減少してきている(環境省、2005)現状を踏まえ、エタノール化が脚光を浴びる状況になってきており、エタノール変換効率に関する研究(折笠ら、2009)やエタノール原料の収集・運搬に関する研究(芋生ら、2010)など多くの研究が行われている。

液体燃料であるバイオエタノールと気体燃料であるバイオガスを比較すると、現在の石油社会において使い勝手が良いのは液体燃料のバイオエタノールであるが、一方で、一般的に同一原料からのエネルギー生産効率を比較した場合に多くの熱量を得ることができるのはバイオガスであると言われている(再生可能エネルギー推進委員会)。

1.4 バイオガス化ーメタン発酵

(1) メタン発酵原理

メタン発酵のプロセスを図 1-2に示す。

メタン発酵によって発生するメタンガスは、メタン生成古細菌が有機物を分解する際に発生する代謝産物の一つである。この分解過程は基本的に4つのプロセスで成立している。

- ①加水分解：様々な種類の嫌気性微生物が作用し、たんぱく質、炭水化物、脂質、セルロースなどの高分子有機物をその酵素の働きによって低分子有機物である単糖やアミノ酸、脂肪酸に加水分解する。
- ②酸生成：加水分解で生成された低分子有機物は、酸生成菌の作用によって有機酸、二酸化炭素、硫化水素、アンモニアへ変換される。
- ③酢酸生成・脱酸素：酸生成で生成された有機酸は、酢酸生成細菌により、酢酸、二酸化炭素、水素に分解される。
- ④メタン生成：酢酸生成・脱酸素で生成された酢酸、水素がメタン生成古細菌の作用でメタンガス、二酸化炭素、水に分解される。

メタン発酵は、様々な微生物の反応が相互に働きあうことから、原料となる有機物も幅広いことが特徴である(Heinz and Barbara, 2002)。

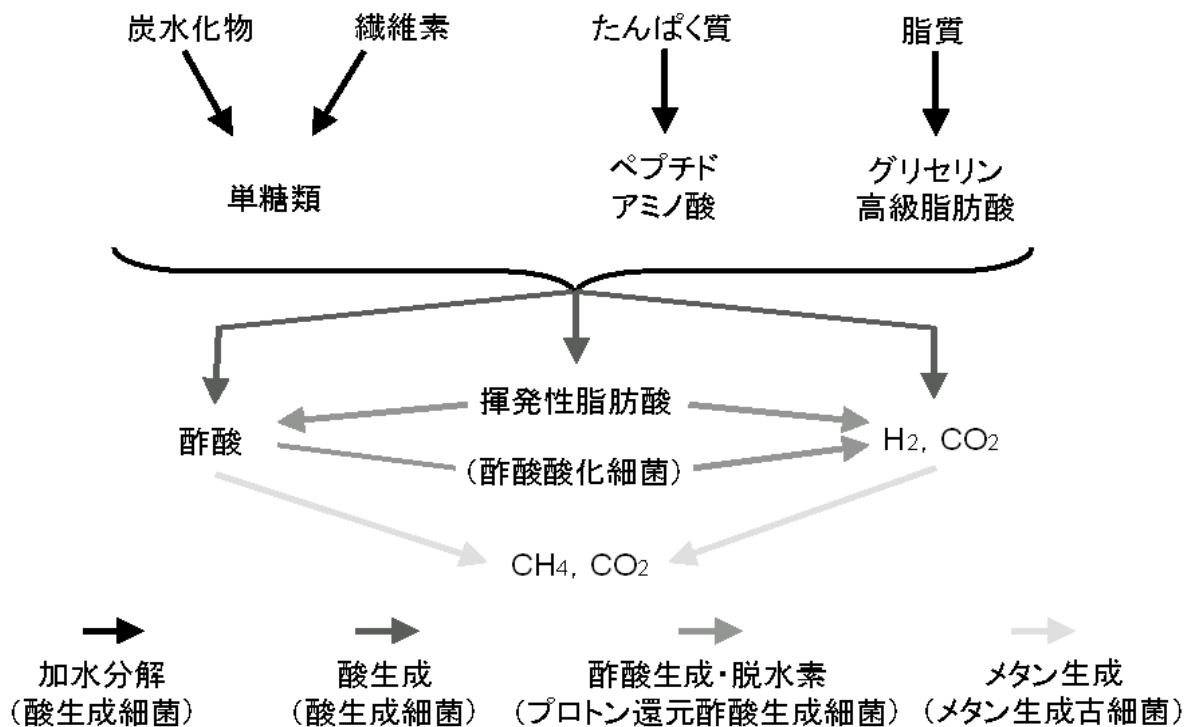


図 1 - 2 メタン発酵プロセス

(2) バイオガスプラント

本稿で取り扱うバイオガスプラントとは、家畜ふん尿を主原料としてメタン発酵処理してバイオガスを発生させ、バイオガスに含まれるメタンガスをエネルギーとして利用する施設である。以下に利点と問題点を列記する。

1) 利点

- ・ 発酵によって原料の流動性が増すので、取り扱いが容易となる。
- ・ メタン発酵は密閉系の設備で行われるので、処理過程で発生する悪臭物質の揮散が防止できる。また、発酵後の液は生糞の悪臭が消失する。
- ・ 密閉系設備で処理することから、気化しやすい窒素の外部放出や揮散がなく、肥料成分となる窒素が残留し、肥料効果が保持される。
- ・ 原料となる家畜ふん尿の従来方式の処理では不可避免的にメタンガスが発生する。メタンガスは重大な地球温暖化効果ガスであるため、バイオガスプラントでの処理利用は不可避免的なメタンガスの大気放出を減らすことができる。
- ・ 原料中の病原微生物や雑草種子を死滅もしくは減少させることができる。
- ・ カーボンニュートラルなエネルギー源であるバイオガスが得られる。

2) 問題点

- ・ 微生物の発酵処理であるため、発酵に関する基本的な知識とこれに基づく適正な運転管理技術（毎日の原料投入や温度管理）が必要である。
- ・ 消化液（メタン発酵後の液）を液肥として農耕地へ散布利用できない場合は污水浄化処理等を行わなければならない。
- ・ メタン発酵では、原料の重量や容量が実質的には減量しないため、消化液を貯蔵するために大容量の貯留タンクを必要とする。
- ・ 投入する基質の種類や量と、バイオガス収量やガス成分の関係が不明である。
- ・ メタンガスは可燃性であるため、防爆等の安全対策を施す必要がある。

- ・ 処理能力が同一の堆肥化プラントに比べ、施設建設費、ランニングコストが高額であり、経済性が悪い。
- ・ バイオガスの輸送技術が未確立なため、現状では発酵槽近くでの利用に限られる。
- ・ 余剰熱の効率的な利用が確立していない。

上述した利点と問題点の中で、バイオガスプラントの最大の特徴は以下の二点である。

- ①カーボンニュートラルなエネルギー源であるバイオガスが得られる。
- ②施設建設費、ランニングコストが高額なために経済性が悪い。

バイオガスプラントは、家畜ふん尿の処理過程の副産物として環境負荷にならないエネルギーを産出し、また、自家消費から余剰となった電力を売電することなどで収入を得ることが可能である。一方、施設建設費、ランニングコストなどが高額なため、家畜ふん尿から発生するバイオガスで得られた収入と自賄いエネルギーだけではバイオガスプラントの運転収支は赤字になる。

バイオガスプラントで処理された消化液は上質な肥料であり、また環境や地域の負担の少ない家畜ふん尿処理法であることは明らかであるが、バイオガスプラント建設に当たっては、どのように経営収支のバランスをとるかが大きな問題である(中久保, 2004)。

この問題を解決する方法として副資材の投入が考えられる。

(3) 副資材について

副資材とは、主資材である家畜ふん尿に混合してメタン発酵することで、メタン発生量を増加させることができる、生ごみやエネルギー作物、農畜産廃棄物などの有機性資源の総称である。メタン発生量を増加させることで、余剰電力の売電収入、余剰ガスの売却収入などの増加によって経済性を向上させることが出来る。そのため、バイオガスプラントの運営には副資材投入が不可欠である(中久保, 2004)。

(4) メタン発酵の律速

1) 律速を支配する要因

副資材の利用にあたり、その対象物は液状のものだけでなく固形物も対象となる。固形物のメタン発酵では、①固形分の加水分解(可溶化)、②可溶化有機物の低分子化、③有機酸及びアルコールからの酢酸・水素生成、ならびに④メタンガス生成の4つの段階が順調に働くことが必要であるが、それぞれの段階で異なる微生物が関与している。この4つの段階のうち、①の固形分の加水分解の効率がメタンガス発生量および発酵残渣発生量を左右している(坪田ら, 2007)。

2) 加水分解の効率を決める要因

A. 資材成分

メタン発酵において、たんぱく質、炭水化物、脂質は加水分解が効率的に進むといわれている。一方、繊維質はそのセルロース構造によって嫌気性条件下では分解されにくく、加水分解は進みにくい。

B. 資材性状

メタン発酵においては資材が液状化しているものの方が微生物の作用が働きやすいため、加水分解されやすい。そのため、固形分濃度の高い資材を利用する場合、加水分解促進のために前処理によって可溶化を行う必要が生じる。

C. メタン発酵温度

メタン発酵は、55℃付近で活動する高温メタン菌群と37℃付近で活動する中温メタン菌群が存在する。加水分解は微生物群から分泌される酵素の作用によって行われる。酵素は高温ほど、その作用が働きやすくなるため、高温発酵が中温発酵より加水分解の効率では有利といわれている。

1.5 稲わらを副資材としたメタン発酵に関する既往の研究

稲わらを副資材としたメタン発酵に関しては、稲の収穫時期を適期よりも遅くし、前処理は消化液と混合して超高温可溶化処理を行い、発酵温度を52℃の高温で発酵させることによって、稲わらをメタン発酵の副資材として有効に利用できたという報告がある（中川、2009）。

しかし、稲わらは、稲の収穫時期に集中的に発生する資材であるから、これを長期にわたってメタン発酵の副資材として利用するためのは、稲わらの保存が課題となる。保存性を向上させるためにサイレージ化した稲わらや、保存中に変質した稲わらがメタン発酵に利用可能であるか否かに関する試験や、稲わらをバイオエタノールの原料として利用した場合とメタン発酵した場合の創出エネルギーの比較などの研究はなされていない。

1.6 本研究の目的

本研究の目的は、以下の2点である。

- ① 稲わらの長期保存形態として稲わらサイレージを選択した。家畜ふん尿を主原料としたメタン発酵に稲わらサイレージを副資材として利用するにあたり、稲わらサイレージの投入形態（裁断、粉碎、腐敗＝変質）がメタン発酵に及ぼす影響を明らかにすること。
- ② 稲わらをバイオエタノール化した場合とバイオガス化した場合における、創出エネルギー量の比較を行い、バイオガス化の優位性を検証すること。

第2章 稲わらサイレージの投入形態に対する 家畜ふん尿のメタン発酵特性

2.1 はじめに

長期間のバイオガス生産に稲わらを安定的に供給して利用するためには、稲わらの保存性を向上させる必要がある。サイレージ化は稲わらの保存性を高めるが、サイレージ化した稲わらをメタン発酵に投入したときのメタン発酵に及ぼす影響等に関する既存の報告はない。そこで、本章では、家畜ふん尿を主原料としたメタン発酵に稲わらサイレージを投入した場合、その投入形態におけるメタン発酵に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

投入形態とは、保存状態の違いから、サイレージと腐敗サイレージの2つを、投入処理方法の違いから、超高温消化液可溶化処理と粉碎処理を設定した。

サイレージは長期間投入することを想定した処理であるが、実際の場面ではサイレージが腐敗してしまうことも想定される。腐敗したとしてもプラントに投入してエネルギーを得ることが可能か否かを確認するための設定である。超高温消化液可溶化処理は、稲わらを副資材としてメタン発酵させる際に有効であることが中川(2009)の報告で明らかになっている。そのため、稲わらサイレージに対する処理効果を検討する。粉碎処理は、有機物の分解速度を高め、メタンガス発生量の増加を期待する処理方法である。

2.2 実験方法

2.2.1 実験装置

実験装置の概略を図2-1に示す。発酵槽は有効容積 1 L のガラス瓶を用いた。発酵槽の加温は恒温器(サンヨー、MIR-253)を用い、発酵温度は恒温器の仕様上限である52℃に保った。発酵槽はシリコン栓によって密閉し、シリコン栓にガス捕集用の穴をあけ、その穴にシリコンチューブとガスパックを取り付け、発生したガスを捕集した。ガスパックはガス発生量の計測や成分分析のために一時的に取り外す必要がある。そのため、ガスパックとシリコンチューブの間にコックを取付け、コックを閉めることによって、発酵槽内の嫌気性を保った。本実験は、バッチ試験である。



図 2 - 1 実験装置の概略図

2.2.2 供試材料

(1) 種消化液

種消化液とは、牛糞生スラリーでメタン発酵を開始する際に、メタン発酵を速やかに安定して起動させるために用いる基質である。高温発酵を実施している、帯広畜産大学フィールド科学センターのバイオガスプラントの消化液を種消化液として使用した。

(2) 稲

稲は、北海道南幌町の農業法人「ほなみ」で食米用として栽培された「きらら397」のコンバイン収穫済みの籾、コンバイン収穫後に田に散らばった稲わらを採取し、原料として使用した。

稲は採取したままの状態のもの（以下、生わら）、わらのみを材料としてサイレージ発酵させたもの、籾と稲わらを用いてホールクロップサイレージに発酵させたものを作成した。

生わらは初期分析用のサンプルを採取後、速やかに冷凍保存した。

わらサイレージは、生わらを原料として一ヶ月間サイレージ発酵させた後に冷凍し、メタン発酵槽への投入直前に自然解凍した。

また、酪農の実際の現場で、残食サイレージをプラントに投入することを想定し、良好に発酵させたサイレージを意図的に腐敗させたサイレージも作成し、実験に用いた。

良好なサイレージと腐敗したサイレージの違いは、サイレージの品質の基準となるpHと乳酸の含有量で判定した。

2.2.3 実験条件

(1) 供試材料の前処理

1) サイレージ化

図2-2に、サイレージ化作業の空気抜き作業の様子を示す。

130cm × 100cm のバルブ式圧縮パックに生わらを約 4kg 詰めて、乳酸菌「畜草 1 号」(雪印種苗)を 0.12g 添加し、掃除機で空気を抜いて、20 ~ 25 °C で 1 ヶ月間乳酸発酵させた。

稲わらのみを詰めて発酵させたものをわらサイレージ (以下、わら S)、わらとコンバインで収穫した籾と一緒に詰めて発酵させたものをホールクロップサイレージ (以下、WCS) とした。



図2-2 サイレージ化作業における空気抜き作業

2) 腐敗

図2-3に腐敗後のWCSを示した。酪農の現場で家畜が残食したサイレージを想定し、1) の手順と同様に同産地の籾も一緒に袋に入れてサイレージ化したWCSを擬似的に腐敗させた。

1 ヶ月間乳酸発酵させたWCSをバットに広げて空気にさらし、腐敗が進行しやすいように全体が軽く濡れる程度の水を添加し、水が蒸発しにくく、かつ、適度に空気が入れ替わるように小さな穴を開けたラップで覆い、4 日間室温で放置した。水の添加量は全体が軽くぬれる程度を目安とし、WCSの籾部には供試材料の 1/7 に相当する重量の水を、WCSのわら部には 1/4 の水を添加した。



図2-3 腐敗期間終了時のWCS

3) 裁断と粉碎

稲わらには難分解性のセルロースが含まれているため、メタン発酵させるときに分解されにくい。バイオガスプラントから消化液を引き抜く際の引き抜き管での目詰まりを考慮すれば、細かく裁断されていることが望ましいと考えられる。ドイツではサイレージ化したコーンを粉碎処理した後にバイオガスプラントに投入し（新エネルギー財団）、発生したメタンガスを燃料として電力と売電収入を得ている。ドイツでは売電単価が高額であるため、サイレージコーンの前処理にコストをかけても採算は合うが、日本においては売電電力料金が安価であるため、投入資材の前処理に多大なエネルギーと労力をかけることはためられる。

本研究において、裁断した稲わらと粉碎した稲わらとでメタンガス発生量に明らかな差が生じる結果が得られれば、粉碎処理を施すことを考慮に入れても良いと考える。

図2-4にサンプルの裁断と粉碎の違いを示す。本研究では、稲わらや稲わらサイレージを2cm程度に切ったものを裁断、0.5cm程度に切ったものを粉碎とした。

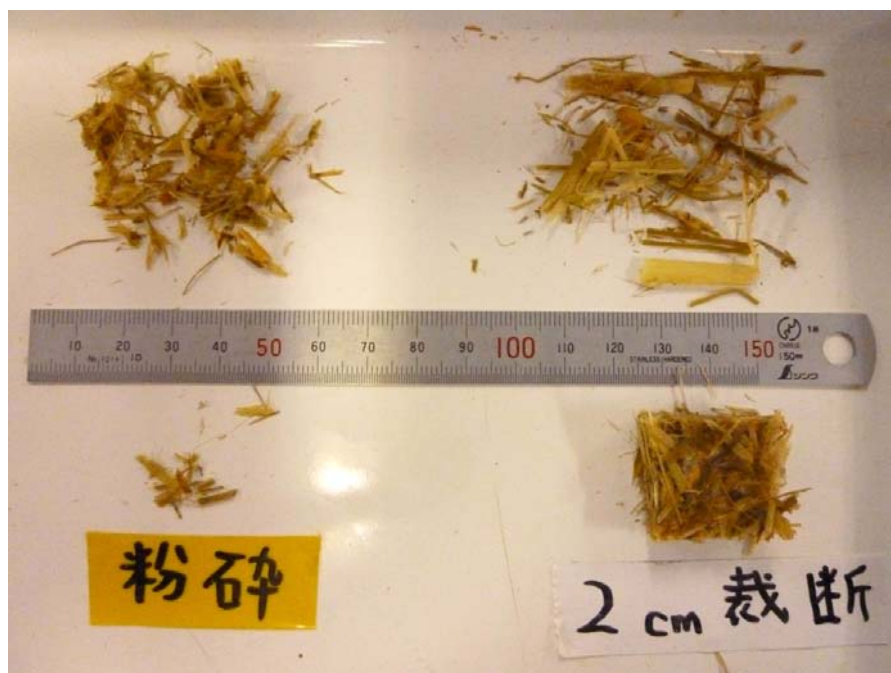


図2-4 裁断と粉碎の違い

4) 超高温消化液可溶化処理

図2-5に超高温消化液可溶化処理の様子を示す。

超高温消化液可溶化処理は、高温消化液中の加水分解酵素が80℃付近で効率的に働くことを期待する前処理方法である。稲わらのように固形分濃度の高い物質をメタン発酵する際に可溶化段階を迅速に行うことがメタン発酵の速度を上昇させる。供試した稲を消化液に浸し、オーブンで24時間×80℃で加温した。稲と消化液の量は、表2-2に示した。超高温消化液可溶化処理によって、稲わらをメタン発酵させる際に投入有機物あたりのメタン発生量、投入有機物の分解率が増加することは中川(2009)により明らかとなったが、サイレージ化した稲に対する効果は検証されていない。

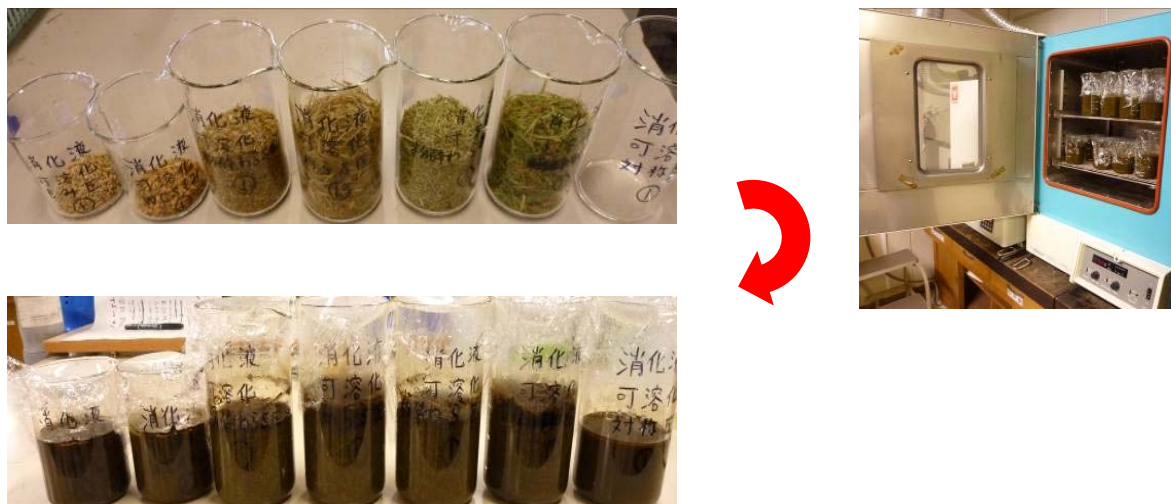


図 2 - 5 超高温消化液可溶化前処理

2.2.4 測定項目

(1) 発生ガス

発生したバイオガスは取り付けたガスパックにて捕集し、ガスパック中のバイオガスをダイアフラム型真空ポンプ（EYELA）に接続した湿式ガスメータ（SHINAGAWA 標準湿式ガスメータ）に吸引し、その流量をバイオガス発生量とした。メタンガス（ CH_4 ）濃度、炭酸ガス（ CO_2 ）濃度はガスクロマトグラフ（島津製作所 GC-14B）を用いて測定した。以下にガスクロマトグラフの稼働条件を示す。

- 1) 検出器：TCD
- 2) キャリアガス：ヘリウムガス
- 3) カラム温度：80℃ 検出器温度：120℃
- 4) メタン、二酸化炭素分析用カラム：信和化工 PorapakQ
- 5) 分析ガス量：0.5mL

(2) 稲、消化液

稲及び消化液は以下の項目を分析もしくは測定した。

測定結果を表 2 - 1 に示す。

- 1) 総固形分（TS）・有機物分（VS）：通風乾燥機（105℃ 24 時間）、電気炉（550℃ 18 時間）
- 2) pH：ガラス電極
- 3) 乳酸濃度、酸性デिटージェント繊維（ADF）：十勝農業協同組合連合会に飼料分析を依頼した。
- 4) アンモニア態窒素濃度（A-N）：水酸化ナトリウム添加水蒸気蒸留法
- 5) 揮発性脂肪酸（VFA）濃度：リン酸添加水蒸気蒸留法

表 2 - 1 供試材料の性状の一覧

	TS	VS	pH	乳酸濃度	ADF	A-N	VFA
	(%)	(%)	-	(%)	(%DM)	(ppm)	(ppm)
消化液	3.2	2.1	7.91	-	-	927	1449
生わら	31.8	26.1	-	-	39.8	-	-
わらS	27.7	23.2	3.9	6.03	39.2	-	-
WCSわら	29.6	24.6	4.0	7.31	38.2	-	-
腐敗WCSわら	22.7	18.7	5.8	0.94	40.1	-	-
粉碎わら	38.0	31.2	-	-	39.8	-	-
粉碎わらS	28.9	24.1	-	-	39.2	-	-

※わらSは稲わらのみで作ったサイレージ

2.2.5 試験区の設定

表 2 - 2 にバッチ試験における試験区の概要を示す。すべての試験区に消化液 500g を投入し、投入する副資材の量は 500g の消化液に含有される有機物量と同量となるようにした。

消化液から発生するメタンガス量は副資材に由来しないものであるから、処理区でのメタンガス発生量から控除する必要がある。そのために、対照区を設置した。

実験結果を比較対象するにあたっては、わらを副資材として使用した処理に関しては生わら区を規準とし、籾を副資材とした処理では生籾区を基準とした。基準の試験区と他の試験区の比較によって、サイレージ化、腐敗、粉碎、消化液可溶化によるメタンガス発生の特徴を明らかにした。

表 2 - 2 バッチ試験における試験区の概要

試験区名称	消化液	生わら	生もみ	わらS	WCSわら	WCSもみ	腐敗WCSわら	腐敗WCSもみ	可溶化消化液	比較対象
対照区	500									
生わら区	500	49.8								○
生もみ区	500		15.6							●
わらS区	500			53.2						○
WCSわら区	500				43.8					○
WCSもみ区	500					19.4				●
腐WCSわら区	500						56.3			○
腐WCSもみ区	500							22.3		●
粉碎わら区	500	49.8								○
粉碎わらS区	500			53.2						○
消化液可溶化対照区	300								200	
消化液可溶化わら区	300	49.8							200	○
消化液可溶化粉碎わら区	300	49.8							200	○
消化液可溶化わらS区	300			53.2					200	○
消化液可溶化粉碎わらS区	300			53.2					200	○
消化液可溶化もみ区	300		15.6						200	●
消化液可溶化WCSもみ区	300					19.4			200	●

※表内の数字は投入量[g]

2.3 結果と考察

2.3.1 わらに対する処理効果

(1) サイレージ化

図 2-6 にわらのみの有機物あたりメタンガス発生量の経時変化を示す。また、図 2-8 に有機物あたりメタンガス発生量の各試験区間の差を示す。

わら区とサイレージ区と比較で、メタンガス発生量に統計学的な有意差は見られなかった。しかし、図 2-7 に示したように、サイレージを原料に用いた試験区がわらを用いた試験区に比べてメタンガス発生量の立ち上がりが鋭いことが確認できた。

本バッチ試験ではサイレージと生わらでメタンガス発生量の総量に差はなかった。しかし、サイレージのほうがメタンガス発生量の立ち上がりが鋭いことから、連続投入となった場合には、メタンガス総量が多くなる可能性があり、稲わらよりもサイレージの方が優れた資材であることが示唆された。

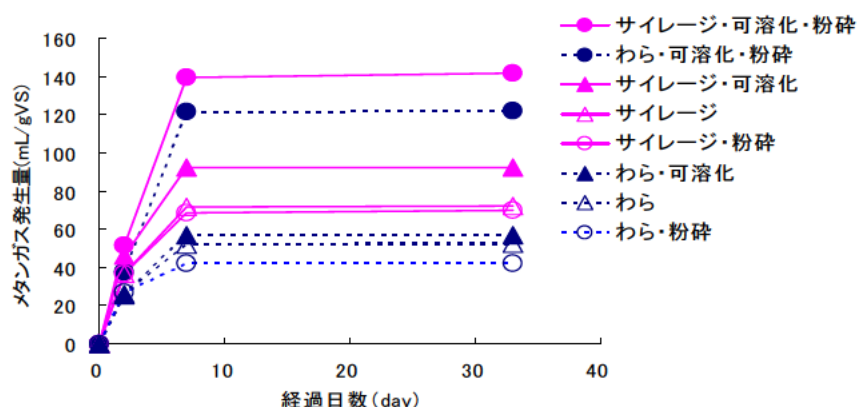


図 2-6 有機物あたりメタンガス発生量（わら）

(2) 腐敗

図 2-7 に WCS わら区と腐敗 WCS わら区のメタンガス発生量の経時変化を示す。

また、図 2-8 に有機物あたりメタンガス発生量の試験区間の差を示す。WCS わら区と腐敗 WCS わら区の比較では、最終的なメタンガス発生量の総量に有意な差はなかった。

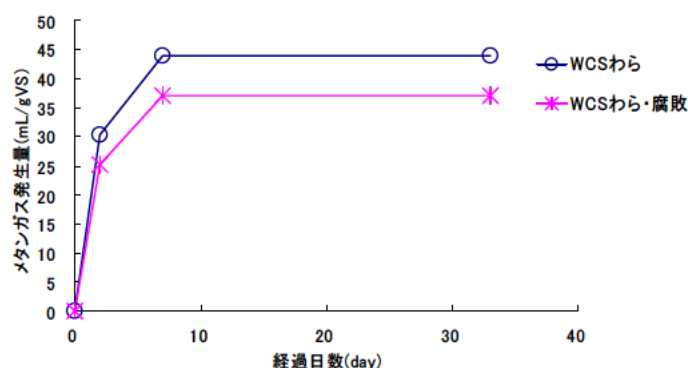


図 2-7 有機物あたりメタンガス発生量（腐敗）

(3) 超高温消化液可溶化処理

サイレージ区とサイレージ・可溶化区との間に最終的なメタンガス発生量の差はなかった

た(図 2 - 6)。このことから、超高温消化液可溶化処理によるメタンガス発生量増加効果は確認できなかった。

(4) 粉碎処理

サイレージ区とサイレージ・粉碎区との間に最終的なメタンガス発生量の差はなかった(図 2 - 6)。このことから、粉碎処理によるメタンガス発生量増加効果は確認できなかった。

(5) 超高温消化液可溶化処理と粉碎処理との併用

図 2 - 8 に有機物あたりメタンガス発生量の超高温消化液可溶化処理単独と粉碎処理を併用した場合の比較を示す。上述したように、超高温消化液可溶化処理単独ではメタンガス発生量増加効果は確認されなかったが、粉碎処理を併用することによって、メタンガス発生量がわら区において 114 %、サイレージ区において 53 % 増加した。このことから、超高温消化液可溶化処理と粉碎処理では併用の効果があることが認められた。

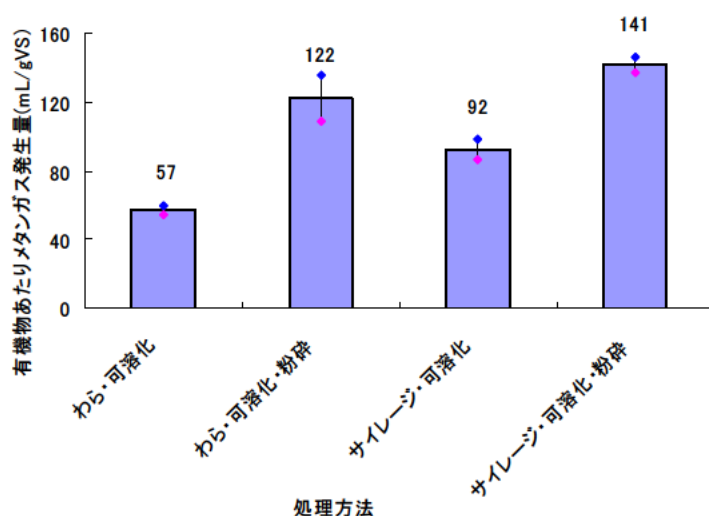


図 2 - 8 有機物あたりメタンガス発生量比較 (超高温消化液可溶化)

(6) 有機物分解率

図 2 - 9 にわらを投入した各試験区の有機物分解率を示す。
全ての試験区で、分解率に統計的な差はなかった。

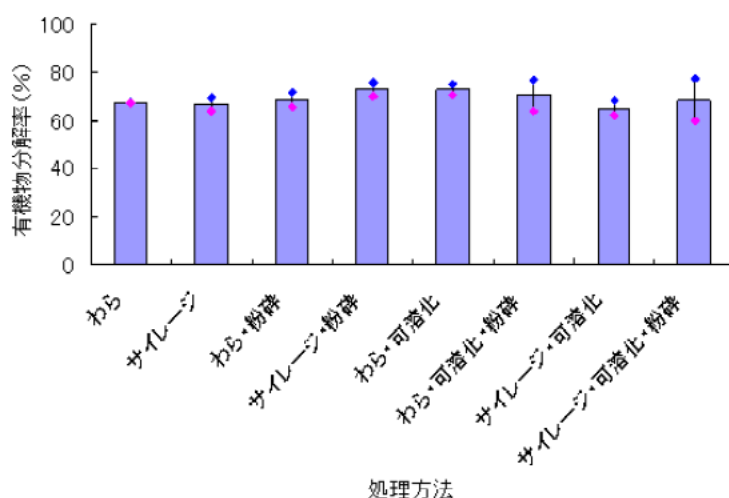


図 2 - 9 有機物分解率

2.3.2 もみに対する処理効果

図 2 - 10 に、もみを供試した試験区における有機物あたりメタンガス発生量の経時変化を示す。処理方法の違いによる効果を以下に記載する。

(1) WCS (ホールクロップサイレージ) 化

もみ区と WCS もみ区ではメタンガス発生量に差がなかった。もみをサイレージ化することによる米粒の分解促進とガス化促進を期待していたが、予想した結果は得られなかった。

(2) 腐敗

WCS もみ区と WCS もみ・腐敗区との間にメタンガス発生量の差はなかった。このことから、腐敗に伴ってメタンガス発生量が減少するという悪影響はないと言える。

(3) 超高温消化液可溶化处理

もみ区ともみ・可溶化区、WCS もみ区と WCS もみ・可溶化区の試験区を比較すると、メタンガス発生量がそれぞれ約 5 倍に増加した。このことから、もみや WCS もみに対して超高温消化液可溶化处理を施すことによって、メタンガス発生量が大幅に増加することが明らかになった。

中川 (2009) は水による可溶化处理を行い、本試験と同様にもみに対するメタンガス発生量の増加効果を明らかにし、稲わらに対しては消化液によって超高温可溶化处理を行い、メタンガス発生量の増加効果を明らかにした。本試験では消化液によってもみに対して超高温可溶化处理を行い大きなメタンガス発生量増加効果が認められたため、消化液によって超高温可溶化处理を行うことによって、稲全体に対してメタンガス発生量増加効果があるということが明らかになった。また、超高温可溶化がもみのメタンガス発生量を増加する効果があるということをより支持する結果となった。もみに対して超高温消化液可溶化处理を行うことによるメタンガス発生量増加効果は、中川 (2009) の報告と同様にもみが糊化したことが要因であると考えられる。

(4) WCS 化と超高温消化液可溶化処理の併用効果

もみ・可溶化区に比べ WCS もみ・可溶化区では有機物あたりメタンガス発生量が 44 % 多かった。このことから、もみに対して WCS 化と超高温消化液可溶化を併用することによって、有機物あたりメタンガス発生量の増加効果が明らかになった。

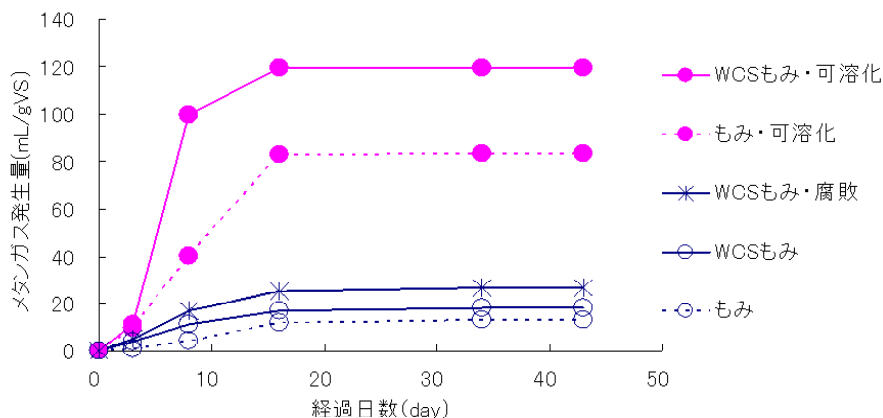


図 2 - 10 有機物あたりメタンガス発生量 (もみ)

2.4 まとめ

本バッチ試験で、わらに対するサイレージ化、腐敗、超高温消化液可溶化、粉碎の各処理は、単独ではメタンガス発生量を増減させる効果は認められなかった。

しかし、超高温消化液可溶化と粉碎処理を併用することによって、メタンガス発生量が飛躍的に増加することが認められた。

サイレージ化によってメタンガス発生量が増加することを期待したが、本実験では増加効果は認められなかった。しかし、サイレージ化によって、わらは長期保存が可能となり、粉碎処理と併用することで、稲わらを長期間にわたって投入し、バイオガスを生産できる可能性が示唆された。

また、サイレージを腐敗させてもメタンガス発生量が減少しないことも明らかになった。

この結果から、家畜の残食したサイレージや保管に失敗したサイレージであっても、バイオガスプラントに投入してエネルギー化できる可能性が示唆された。

もみをメタン発酵の副資材として利用することは、食糧と競合しない未利用セルロース系バイオマスである稲わらをエネルギー生産のために利用しようという本研究の趣旨にはそぐわないが、例えば、家畜の残食をカスケード的にエネルギー生産のために利用するとした場合、不可避免的に、もみもプラントに投入されることが考えられる。そのような場合であっても、本章で示された結果から、超高温消化液可溶化処理を行うことによって、もみから有効にバイオガスを取得できる可能性が示唆された。

水田を保全するためには、生産物である稲を余すことなく有効に利用することは重要であり、本章の結果によって、稲（特に稲わら）をカスケード的に利用する大きな可能性が示唆された。

これらの結果を踏まえ、第3章では連続メタン発酵実験によってバイオガス化の実用性を追及する。投入副資材は長期投入を想定して稲わらサイレージのみに絞る。バッチ試験で併用処理がメタンガス発生量増加効果が高いことが示されたので、前処理として、超高温消化液可溶化処理と粉碎処理を併用し、これらの処理が連続メタン発酵に及ぼす影響を明らかにする。

第3章 稲わらサイレージに対する超高温消化液可溶化処理及び粉砕処理が家畜ふん尿メタン発酵に与える影響

3.1 はじめに

第2章で、家畜ふん尿を主原料としたメタン発酵に、サイレージ化した稲わらを投入しても、生わらと同程度のメタンガスを発生させられることが示唆された。また、超高温消化液可溶化処理や粉砕の単独処理はメタンガス発生量を増加させなかったが、これらの処理を併用させることでメタンガス発生量が大幅に増加する結果が得られた。

そこで、バッチ試験の結果を踏まえて、より実用的なプラントの稼働方式である連続メタン発酵実験を行った。原料の形態は、長期にわたって稲わらを利用することを踏まえて、生わらは使用せず、稲わらサイレージのみに絞り、超高温消化液可溶化処理や粉砕処理が家畜ふん尿メタン発酵に与える影響を明らかにすることを本章の目的とする。

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

(独)土木研究所寒地土木研究所資源保全チーム所有の発酵槽を用いて実験を行った。

発酵槽は市販の微生物用ファーメンタ（東京理化機器 MBF-800ME）をメタン発酵実験用に改造したもので、6基用いた。

実験装置の概略図を図3-1に示す。発酵槽は容積8L、有効容積6Lのガラス円筒製で、上部に原料投入口を設け、下部に消化液排出口を設けたものである。発酵原料投入口にはボールバルブが取り付けられており、発酵原料投入の際に外気の流入を遮断して発酵槽内の嫌気状態が保たれるように注意した。また、発酵槽内に設置したプロペラ式攪拌機により100rpmで連続攪拌を行った。温度制御の方式は、恒温水槽で一定温度に調整された温水が発酵槽の下部1/2を覆うように製作されている二重のガラス壁内を循環させることで一定に保つ、ジャケット加温方式である。

発生したバイオガスは湿式ガスメータでガス量を計測した後に、排気管で大気放出した。

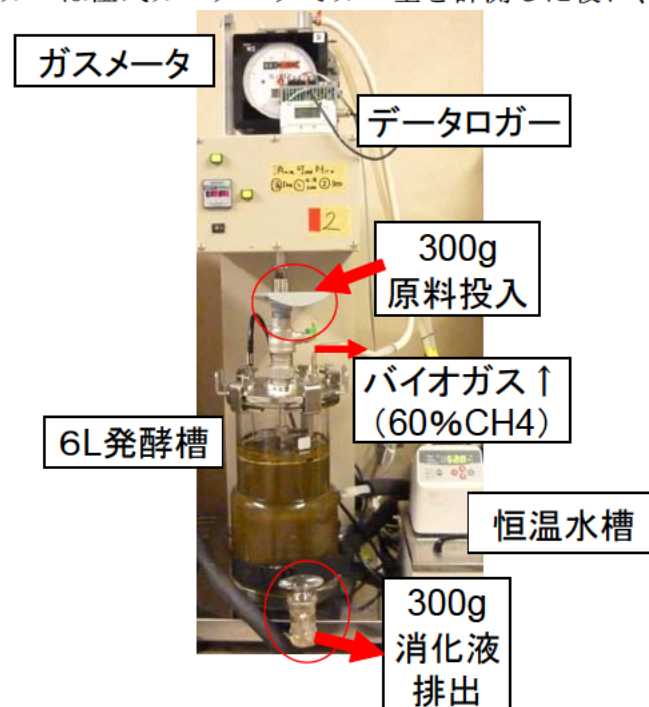


図3-1 実験装置の概略図

3.2.2 供試材料

(1) 牛ふん尿スラリー

牛ふん尿スラリーは(独)土木研究所寒地土木研究所別海資源循環試験施設の固液分離液分ピットから採取した牛ふん生スラリー(固液分離機により大きな敷料等を取り除いたもの)を用いた。これは同施設のバイオガスプラントで使用されている牛ふん尿である。

(2) 種消化液

第2章と同様に、帯広畜産大学フィールド科学センターのバイオガスプラントから採取した高温発酵消化液を供試した。

(3) 稲わらサイレージ

第2章のバッチ試験で用いた稲わらを2ヶ月発酵させて作成した稲わらサイレージで、冷凍保存したものを供試した。

各材料の性状を表3-1に示す。

表3-1 供試材料の性状

	TS(%)	VS(%)	pH	NH ₄ ⁺ -N(ppm)	VFA(ppm)
牛ふん生スラリー	6.7	4.9	6.55	2056	8269
種消化液	3.5	2.3	7.62	2303	1352
稲わらサイレージ	27.1	22.5	3.96	-	-

3.2.3 実験条件

(1) 実験区の設定

表3-2に本実験における実験区を示す。

本章では投入前処理がメタンガス発生量に及ぼす影響を明らかにすることを目的としているため、有機物負荷は限界負荷にはこだわらず、中久保(2009)の報告にある炭水化物の限界負荷 2.4(gVS/L・day)の半分程度とし、発酵阻害が起きにくい設定とした。そのため、稲わらサイレージを投入する試験区すべてにおけるサイレージ投入量は投入原料の10%にあたる30gであり、有機物負荷は1.1(gVS/L・day)とした。

超高温消化液可溶化処理を行った実験区と超高温消化液可溶化処理を行わない実験区を比較し、超高温消化液可溶化処理効果を検討した。また、粉碎した実験区と粉碎していない実験区を比較することで、粉碎処理の効果を検討した。さらに、超高温消化液可溶化処理と粉碎のどちらも行った実験区も設置し、超高温消化液可溶化処理と粉碎の併用効果についても検討した。

表3-2 実験区の設定

実験区名称	投入物				消化液抜き取り量
	生スラリー	わらS 裁断	可・消	粉碎	
対照区	300	-	-	-	300
可溶化対照区	300	-	-	200	500
わらS区	270	30	-	-	300
わらS可溶化区	270	-	-	200	500
わらS粉碎区	270	30	30	-	300
わらS粉碎可溶化区	270	-	30	200	500

※わらSは稲わらサイレージ、可・消は可溶化消化液

※表の数字は投入量[g]

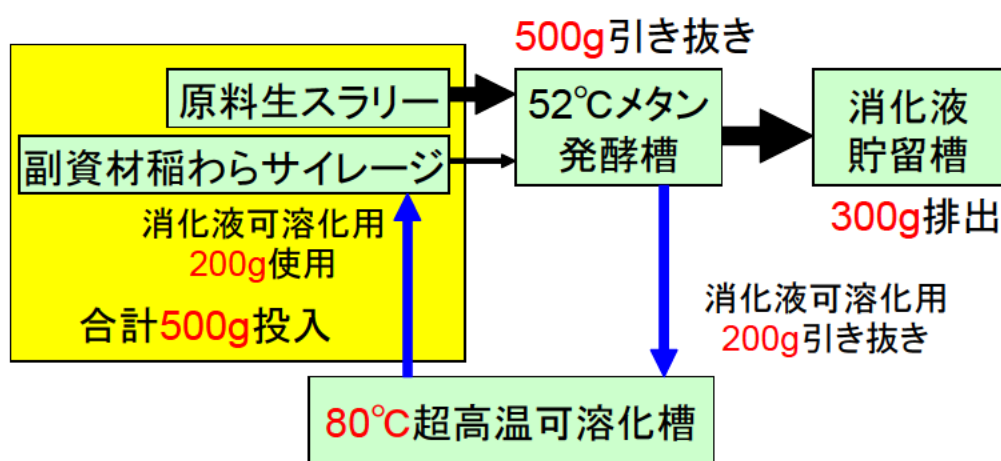
(2) 前処理

1) 超高温消化液可溶化処理

図3-2に超高温消化液可溶化処理の投入方法を示す。

超高温消化液可溶化処理とは、消化液中に棲息している好熱菌の有機物分解能力を利用

消化液の均一化を目的として、一日一回の消化液採取の直前と、一日一回の原料投入直後に、強めの攪拌を1分間行った。



- 2) pH：ガラス電極メーター
- 3) アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)濃度：水酸化ナトリウム添加水蒸気蒸留法
- 4) 揮発性脂肪酸(VFA)濃度：リン酸添加水蒸気蒸留法

3.2.5 投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量

投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量は、実験期間中の稲わらサイレージ投入実験区のメタンガス発生量から、牛ふん尿生スラリー由来のメタンガス発生量を減じた値を実験期間中の総稲わら VS 量で除して算出した。牛ふん尿からのメタンガス発生量は対照区の投入 VS あたりメタンガス発生量から算出した。

3.3 結果と考察

3.3.1 解析期間

図 3-3 に各試験区のバイオガス発生量の経時変化を日単位で示した。

対照区において 31 日目にバイオガス発生量が極端に減少したが、これは操作ミスにより恒温水槽の主電源が終日切れてしまったことが原因である。32 日目以降も 31 日目までと同様に生スラリーを投入し発酵阻害は見られなかったが、31 日目の加温停止に伴い発酵されなかった有機物が一時的に蓄積し、対照区において 32 日目以降のバイオガス発生量が増加した。このため、31 日目以降の対照区におけるバイオガス発生量は 10 - 30 日目までのバイオガス発生量の平均を用いてメタンガス発生量の算出を行った。

また、39 日目に裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区においてバイオガス発生量の一時的な増加が見られた。これは、38 日目の消化液引抜作業において消化液を 500g 引き抜かなければいけないところを 300g しか引き抜かなかったことが原因であると考えられるため、39 日目は解析期間から除外した。それ以外の期間は、顕著な発酵阻害が見られず正常に発酵が進んだと判断されたことから、10 日目から 38 日目を本章の解析期間と定めた。

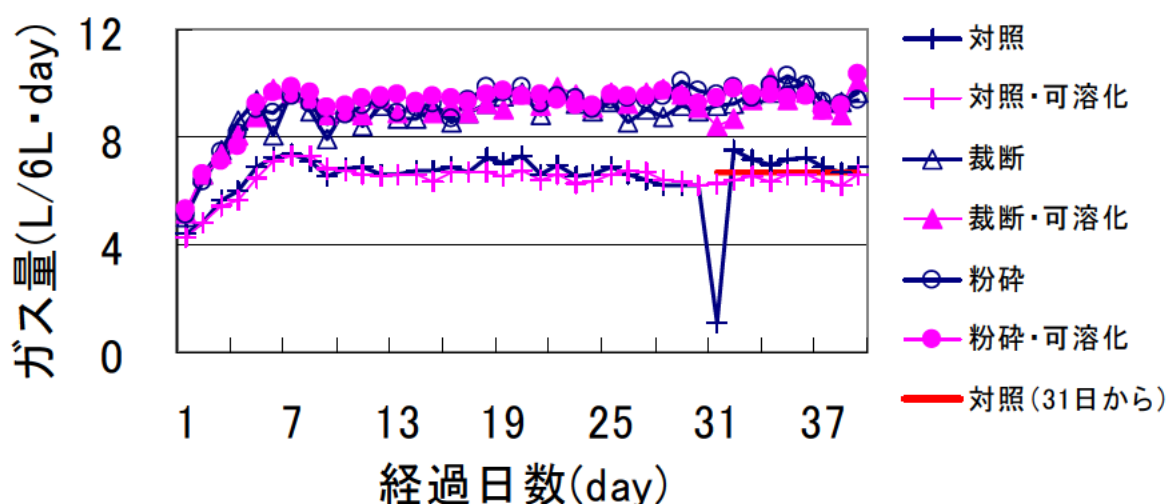


図 3-3 バイオガス発生量の経時変化

3.3.2 発酵容積あたりメタンガス発生量

図 3-4 は発酵容積あたりメタンガス発生量の経時変化であり、メタンガス発生能力を示す指標の一つである。対照区、可溶化対照区のメタンガス発生量はそれぞれ 0.69L/L、0.68L/L であったのに対し、裁断区、裁断・可溶化区、粉碎区、粉碎・可溶化区の各メタンガス発生量はそれぞれ 0.92L/L、0.94L/L、0.95L/L、0.96L/L であった。

稲わらサイレージを投入したすべての試験区において、対照区または可溶化対照区と比較しメタンガス発生量が 32 % 以上増加した。この結果から、稲わらサイレージを副資材としてメタン発酵をさせることによって、牛ふん生スラリーを単独で投入するよりも大幅にメタンガス発生量を増加させられることが明らかになった。

また、裁断区と比較し、裁断・可溶化区、粉砕区においてメタンガス発生量がそれぞれ 3 %、4 % 増加した。このことから、稲わらサイレージをメタン発酵させる際に、稲わらサイレージを粉砕、または超高温消化液可溶化処理を行うことによって、メタンガスを発生させる能力が向上することが明らかになった。

粉砕・可溶化区は裁断・可溶化区と比較しメタンガス発生量が 2 % 増加したが、粉砕・可溶化区と粉砕区との間にはメタンガス発生量の差は見られなかった。このことから、超高温消化液可溶化処理と粉砕処理を併用させることによるメタンガス発生量の増加効果があるとは必ずしも言えないことがわかった。

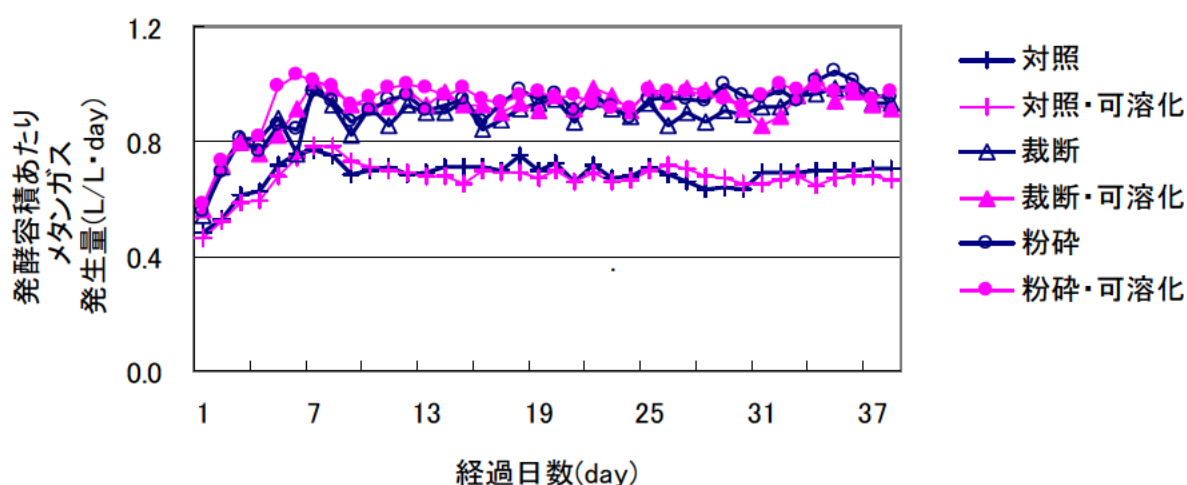


図 3 - 4 発酵容積あたりメタンガス発生量の経時変化

3.3.3 投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量

図 3 - 5 に投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量の経時変化を示した。

投入副資材有機物あたりでのメタンガスの発生効率を示す指標の一つである。裁断区、裁断・可溶化区、粉砕区、粉砕・可溶化区の各試験区における投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量はそれぞれ 0.26L/gVS、0.29L/gVS、0.29L/gVS、0.31L/gVS であった。

裁断区と比較し粉砕区でメタンガス発生量が 11 % 増加した。このことから、粉砕処理を行うことによって、投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量を大幅に増加させられることが明らかになった。これは、粉砕処理によって稲わら表面積が増加することで消化液が稲わらに触れる面積が増加し、酸生成菌とメタン菌に分解が促進したことが要因であると考えられる。

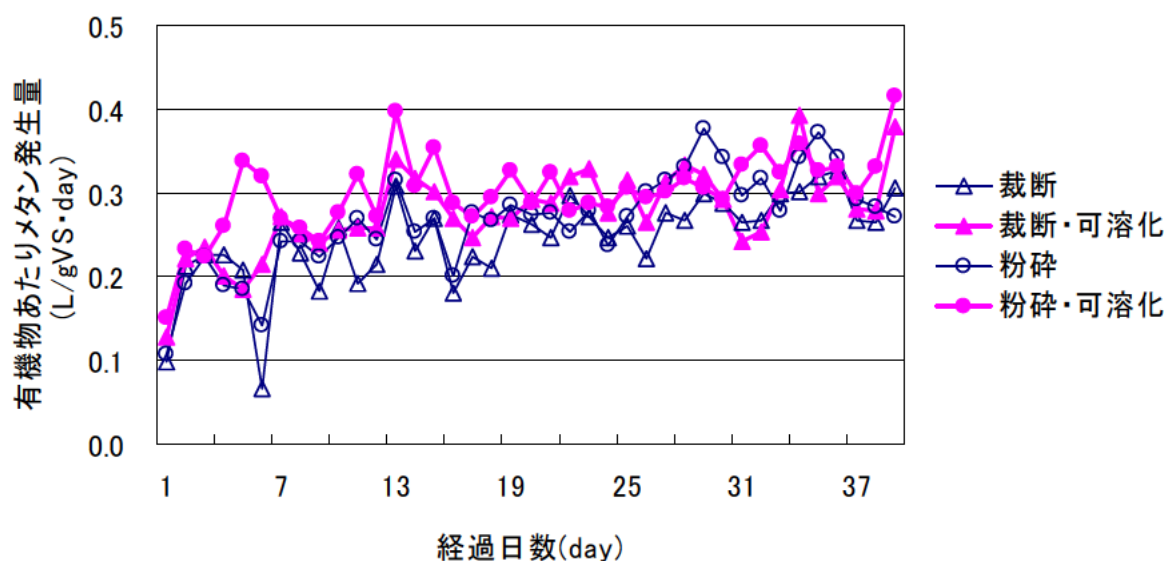
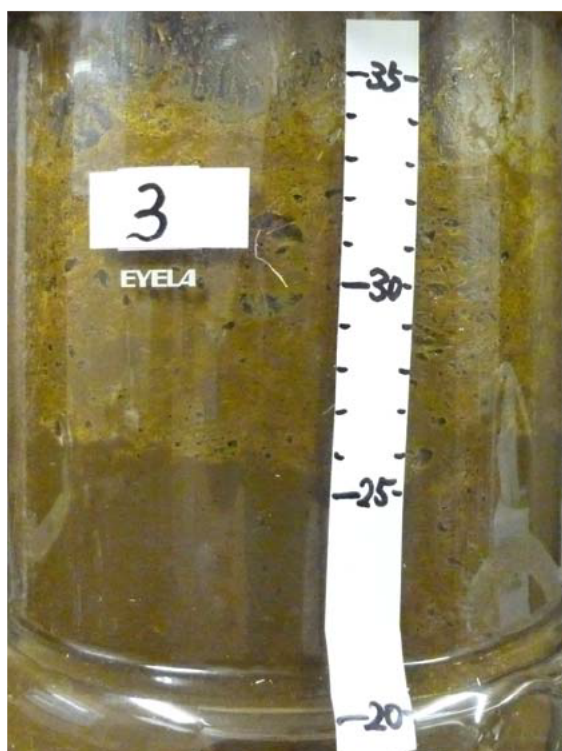


図 3－5 投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量の経日変化

また、裁断区と比較し、裁断・可溶化区でメタンガス発生量は 12 % 増加した。このことから、超高温消化液可溶化処理を行うことによって投入副資材有機物あたりメタンガス発生量を大幅に増加させられることが明らかになった。超高温消化液可溶化処理によるメタンガス量増加の現象は 2 つの要因が考えられる。1 つ目の要因は、高温可溶化処理によって、稲わら中に含まれる難分解性有機物であるセルロースやリグニン等の一部が分解され、メタンガス化されやすい易分解性の有機物の割合が相対的に増加したことである。2 つ目の要因は、超高温消化液可溶化処理によって、スカムの発生が緩和されたことである。

図 3－6 は連続メタン発酵 16 日目と 39 日目のスカムの発生状況であり、図 3－7 はスカムの厚さの経日変化である。16 日目以降は全試験区において厚さ 4 ～ 8cm のスカムが形成されたが、可溶化が施されている試験区は可溶化を施していない試験区と比較しスカムの発生量が緩和された。スカムは稲わらが液面近くに浮かび上がることによって形成されており、スカム中には未分解稲わらも含まれている。そのため、超高温消化液可溶化処理によりスカムの形成が抑制され、メタンガス発生量が増加したと考えられる。

裁断・可溶化区と比較して粉碎・可溶化区ではメタンガス発生量が 6 % 増加し、粉碎区と比較して粉碎・可溶化区では同様にメタンガス発生量が 8 % 増加した。このことから、超高温消化液可溶化処理と粉碎処理を併用させることによって、メタンガス発生量を増加させられることが明らかになった。これは、前述した超高温消化液可溶化処理と粉碎処理に伴う現象が複合したことによる効果であると考えられる。



(a) 16 日目



(b) 39 日目

図 3 - 6 連続メタン発酵 16 日目と 39 日目のスカムの発生状況

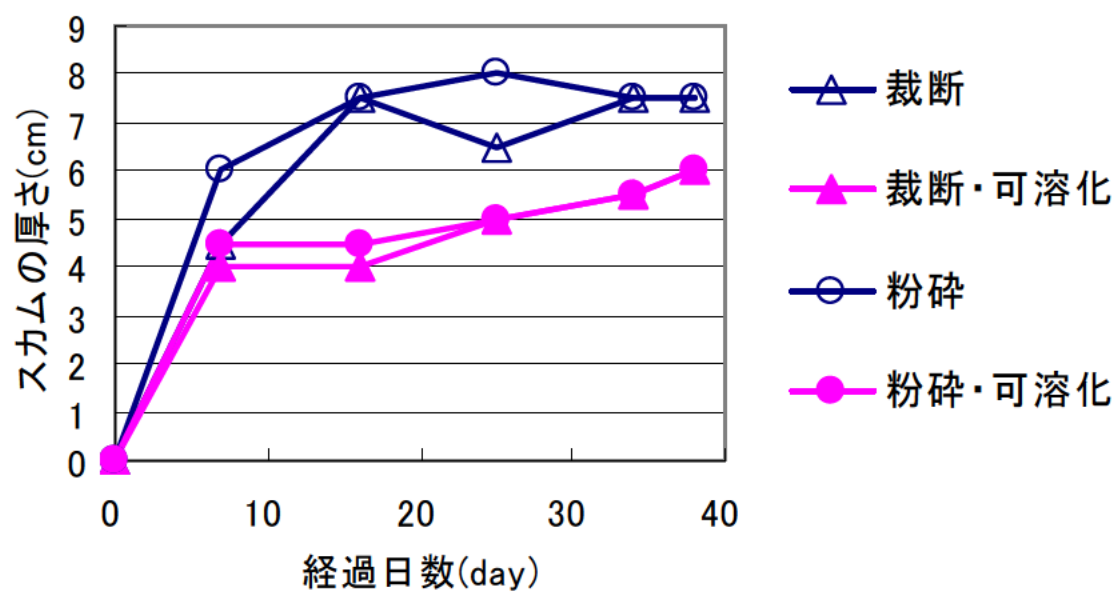


図 3 - 7 スカムの厚さの推移

3.3.4 有機物分解率

表 3－3 に各試験区での稲わらの有機物分解率とメタンガス発生量の関係を示した。

裁断区、裁断・可溶化区、粉碎区、粉碎・可溶化区の各試験区における分解率はそれぞれ 64 %、70 %、57 %、63 %であり、裁断・可溶化区が最も有機物が分解されており、裁断区と粉碎・可溶化区との分解率に差がなく、最も分解率が低かったのが粉碎区である。粉碎区において一番分解率が低かったのは、消化液引抜作業前の強制攪拌によりスカムを構成していると考えられる未分解稲わらの一部がそのまま排出されたことが原因であると考えられる。

注目すべきは裁断区と粉碎・可溶化区との間に差がなかったことである。稲わら有機物あたりメタンガスの発生は稲わら中に含まれる有機物がメタン発酵によって分解されることによるものだが、本実験においてメタンガス発生量と有機物分解率の優劣は一致しなかった。稲わら有機物あたりメタンガス発生量において 19 %の差があった裁断区と粉碎・可溶化区の 2 試験区が、分解率において差が生じないのは不自然と考えられる。

表 3－3 有機物分解率と有機物 (VS) あたりメタンガス発生量

	裁断	裁断・可溶化	粉碎	粉碎・可溶化
有機物分解率(%)	64.3	70.2	57.0	63.4
VSあたりCH ₄ 発生量 (L/gVS・day)	0.26	0.29	0.29	0.31

$$\text{分解率} = \frac{(\text{稲Input} - \text{稲Output})}{\text{稲Input}} * 100 \quad \dots \quad (\text{式 3-1})$$

有機物分解率の計算方法を式 3－1 に示した。

この式における変数は稲わら由来有機物の Output のみである。稲わら由来有機物の Output は引き抜いた消化液の強熱減量＝有機物分 (VS) から算出したが、排出口を稲わらが通過しなければ有機物分解率を正確に計測することができない。連続発酵試験終了後の片付け作業において、消化液を全て引抜いた後に発酵槽内に残った稲わらを確認した。裁断した稲を投入した試験区において粉碎処理した試験区と比べて多くの稲わらが残留していた。このことから、連続試験中の毎日の引抜作業の際にも裁断処理をした稲わらを投入した試験区において稲わらが均等に排出されていなかったことが示唆された。このことから、稲わら有機物あたりメタンガス発生量において 19 %の差があった裁断区と粉碎・可溶化区の 2 試験区が、分解率において差が生じないという不自然な結果となってしまったものと考えられる。

図 3－8 は本実験で用いた発酵槽の排出口の拡大図である。

本実験で用いた発酵槽の引抜口の直径は約 2cm であり、裁断処理、粉碎処理をした稲わらの長さはそれぞれ 2cm、0.5cm である。このことから、下部から消化液を排出する形態のバイオガスプラントにおいて稲わらサイレージを発酵させる際には、排出口の直径と同程度に裁断された稲わらでは十分に排出が行われませんが、排出口の 1/4 以下の長さに粉碎処理を行うことによって稲わらの排出が円滑に行われることが示唆された。



図 3 - 8 発酵槽の消化液引抜排出口

3.3.5 揮発性脂肪酸 (VFA)

図 3 - 9 に消化液の揮発性脂肪酸 (VFA) 濃度の経時変化を示す。揮発性脂肪酸の濃度に試験区間の差はなかったが、全試験区において揮発性脂肪酸は増加傾向にあった。揮発性脂肪酸はメタン発酵の中間生成物であるため、メタンガス発生量が一定である条件において揮発性脂肪酸が増加したということは、投入した原料に由来する揮発性脂肪酸が全てメタンガスに分解されず、蓄積していったことを示す。

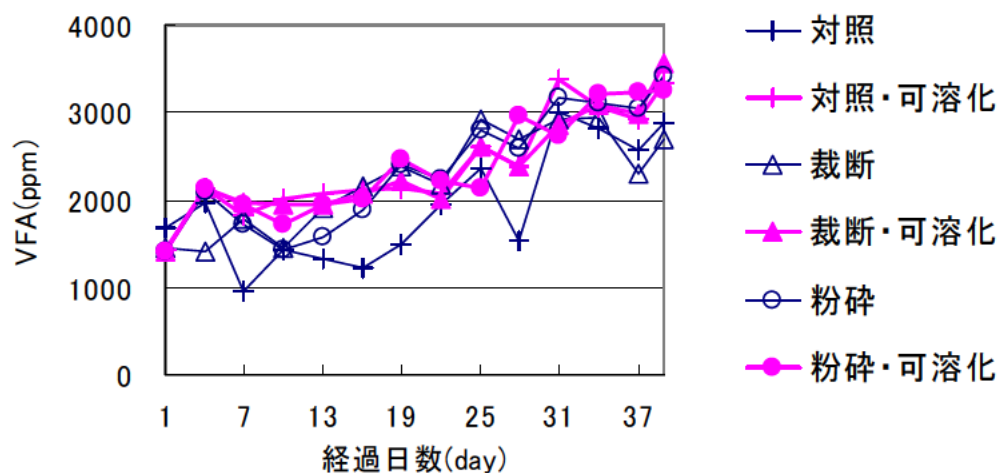


図 3 - 9 揮発性脂肪酸濃度の経時変化

3.3.6 アンモニア態窒素(NH₄-N)

図 3 - 10 に消化液中のアンモニア態窒素濃度の経時変化を示す。アンモニア態窒素の濃度は各試験区で差がなく、全試験区においてアンモニア態窒素の濃度が徐々に上昇する傾向が認められた。稲わらを投入していない対照区においても増加したことから、増加の原因は稲わらの投入ではなく生スラリーの投入によるものであると考えられる。アンモニアはメタン発酵の阻害物質であり、高温メタン発酵ではアンモニア態窒素が蓄積しやすいと言われている。中川(2009)の報告では、超高温消化液可溶化処理によってアンモニアによる発酵阻害を防止できる可能性が示唆されていたが、本実験では発酵阻害の防止効果は確認できなかった。

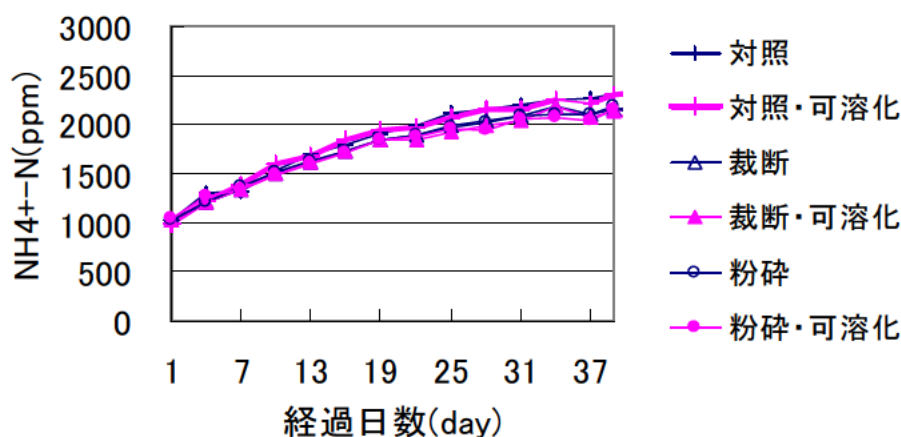


図 3 - 10 アンモニア態窒素濃度の経時変化

3.3.7 pH

図 3 - 11 に pH の経時変化を示す。pH に試験区間の差はなく、発酵開始から 15 日目くらいまでは上昇傾向にあったが、その後は安定した。メタン生成菌の適切な pH 領域は 6.8-8.2 程度と言われており（野池達也編、メタン発酵）、本実験ではほぼ適正な範囲内に収まっていたため、メタン生成菌群の活動は正常どおり行われていたと考えられる。

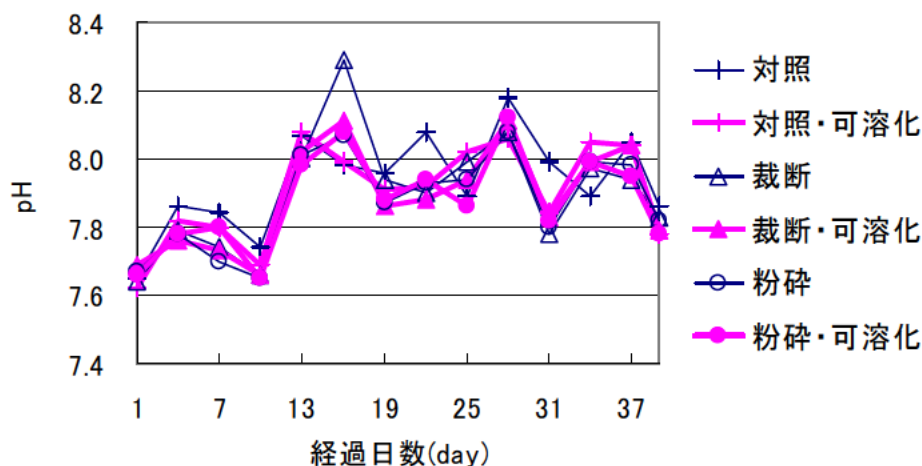


図 3 - 11 pH の経時変化

3.4 まとめ

本章では、稲わらサイレージに対する超高温消化液可溶化処理や粉碎処理が家畜ふん尿連続メタン発酵に与える影響を追究することを目的とした。稲わらサイレージを投入した試験区において、対照区と比較しメタンガス発生量が 32 %以上増加した。また、粉碎処理を施すことによって、メタンガス発生量は 12 %増加した。これは、粉碎処理によって稲わらの表面積が増加することで消化液が稲わらに触れる面積が増加し、より多くの稲わらがメタンガスに分解した結果であると考えられる。

また、超高温消化液可溶化処理により稲わらサイレージを裁断したのみの試験区と比べてメタンガス発生量が 12 %増加することが明らかになった。この現象に対しては 2 つの要因が考えられた。その 1 つはスカムの発生量が超高温消化液可溶化処理を行うことによって緩和されたこと、もう 1 つはセルロース等の難分解性有機物が分解されたことであるとされる。また、超高温消化液可溶化処理と粉碎処理を併用することによって、稲わらサイレージを裁断したのみの試験区と比べてメタンガス発生量は 19 %増加した。

超高温消化液可溶化処理によるメタンガス発生量の増加効果に関しては 2 つの仮説を立てられるが、次章の第 4 章で明らかにする。

第 4 章 スカムの発生量がメタン発酵に与える影響

4.1 はじめに

第 3 章において、超高温消化液可溶化処理によるメタンガス発生量増加現象に 2 つの要因が考えられた。1 つは超高温消化液可溶化処理によりスカムの発生量が減少したという要因であり、もう 1 つはセルロースなどの難分解性有機物が超高温消化液可溶化処理により分解され、メタンガス化されやすい易分解性の有機物の割合が相対的に増加したという要因である。これらの 2 つの要因のうち、どちらが有力であるかは定かでない。

連続発酵 39 日目の排出作業において、排出量を本来引き抜かなければいけない 500g ではなく、誤って 300g としたため、消化液 200g の分だけ消化液の水位が上昇し、38 日目まで厚く堆積していたスカムの量が大幅に減少した。このことから、消化液に泡切り攪拌羽根を浸して攪拌することによって、スカムの量が大幅に減少することが示唆された。

そこで本章では、消化液の投入・排出量を調整することによって消化液の水位を調節し、スカムを破砕させることを試みる。そしてスカムを破砕させた後に、超高温消化液可溶化処理を施した試験区と施していない試験区とで改めてメタンガス発生量を比較し、超高温消化液可溶化処理によるメタンガス発生量増加の要因がスカム発生量の減少によるものであるかどうかを明らかにすることを本章の目的とする。

4.2 実験方法

4.2.1 スカムの破砕

図 4 - 1 に本実験で用いた発酵槽の攪拌羽根、消化液部、スカム部、バイオガス部の模式図を示す。攪拌羽根は 3 段の羽根車から構成されており、最下段と中間の羽根車は消化液の攪拌用であり、最上段の羽根はバイオガスを攪拌したり消化液液面にできるスカムや泡を切るための羽根である。

本実験では、38 日目までは図 4 - 1 の模式図のように、消化液液面と泡切り攪拌羽根との間の空間にスカムが厚く形成されていた。

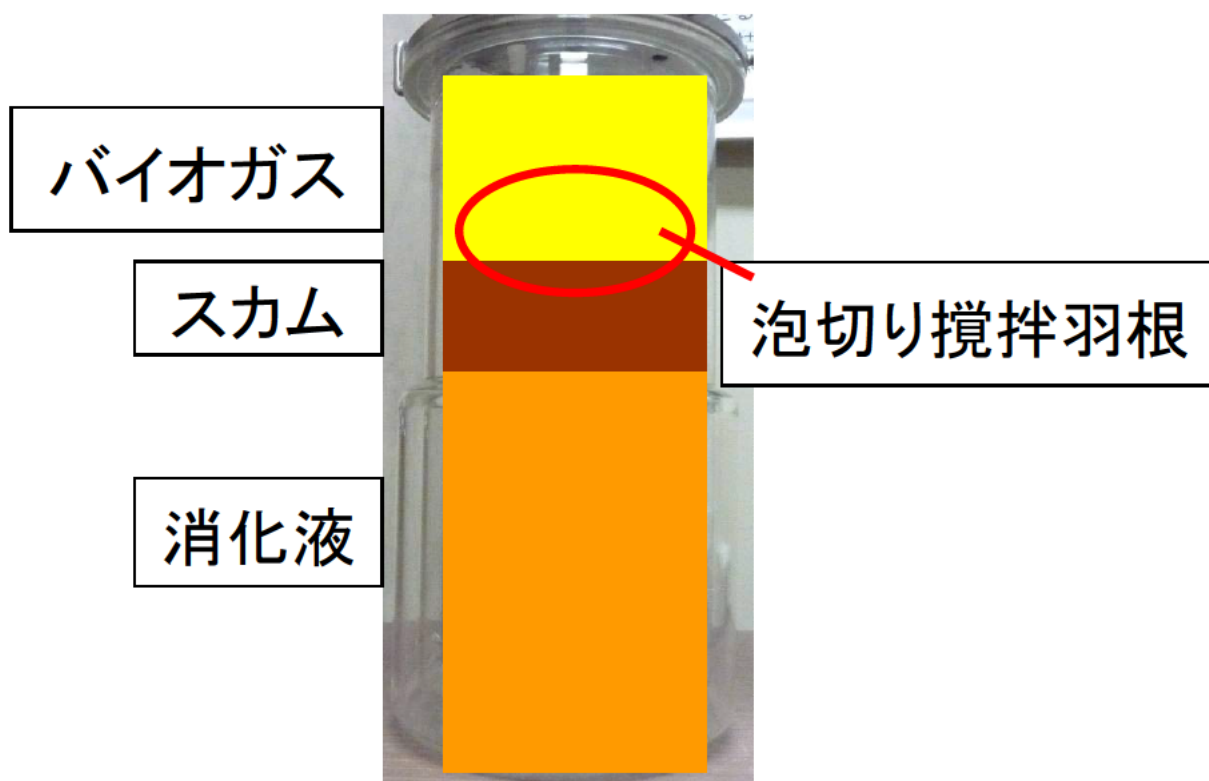


図 4－1 攪拌羽根と消化液の模式図

図 4－2 は消化液の液面を泡切り攪拌羽根の直下まで上昇させた場合の泡切り攪拌羽根と消化液の模式図である。消化液液面が泡切り攪拌羽根に浸る程度まで高くすると、消化液液面に波が起こり、発生したスカムを即座に消化液が巻き込んでしまう状況となり、スカムが図 4－1 のように厚く堆積した状況にはならなかった。



図 4－2 消化液の液面を上昇させた場合の攪拌羽根と消化液の模式図

4.2.2 実験方法の詳細

実験装置、供試材料は第 3 章の連続メタン発酵と同様である。また、表 4 - 1 に連続発酵 39 日目以降の各試験区における原料投入物と発酵槽内消化液の水位を示す。39 日目の投入作業は 38 日目までと同様の投入方法である。39 日目の排出作業において、裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区の引抜量を 200g 少なくし、水位を高くした。40 日目の排出作業において、裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区から 39 日目に少なくした分の 200g を引抜き、全試験区の消化液の水位を統一した。41 日目以降の投入作業では、牛ふん尿生スラリー 300g のみを投入し、41 日目の排出作業のみ行わないことにより消化液の水位を高くした。42 日目以降の排出作業は投入量と等量の 300g とし、消化液の水位を泡切り攪拌羽根に浸る高さに設定した。

発酵・解析期間は、消化液の排出作業を誤って行った 39 日目からメタンガス発生量が対照区と同じ水準に落ちるまでを目安とし、49 日目まで発酵を続けた。

経過日数(day)		39	40	41-49
液面 高さ	対照区	低	低	高(6300g)
	対照・可溶化区	低	低	高(6300g)
	裁断区	低	低	高(6300g)
	裁断・可溶化区	高(6200g)	低	高(6300g)
	粉碎区	低	低	高(6300g)
	粉碎・可溶化区	高(6200g)	低	高(6300g)
原料投入物		稲・生スラリー	なし	生スラリー

※()は消化液量を示す。

「低」の試験区の消化液量はすべて6000g。

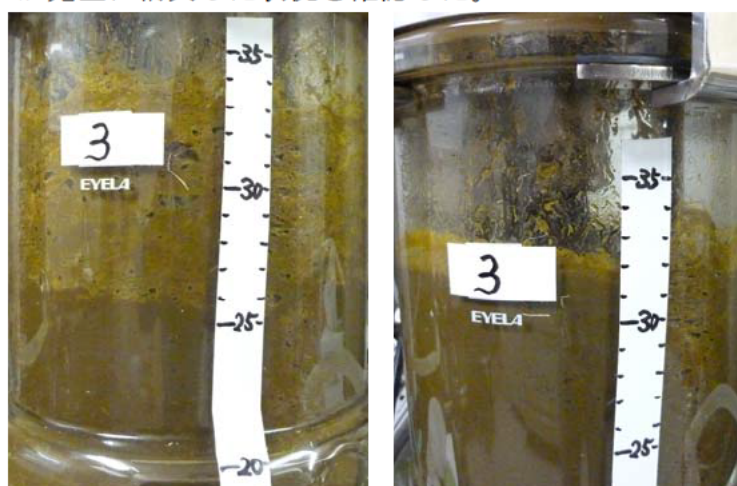
表 4 - 1 39 日目以降の原料投入物と発酵槽内消化液の水位

4.3 結果と考察

4.3.1 スカムの厚さ

図 4 - 3 に裁断区のスカムの写真を示す。

38 日目まで裁断区では図 4 - 3(a)のように 7 ～ 8cm 程度のスカムが堆積していたが、42 日目にはスカムが完全に消失した状況を確認した。



(a) 38 日目

(b) 42 日目

図 4 - 3 裁断区のスカム発生状況

図 4-4 にスカムの厚さの経時変化を示す。

39 日目に裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区において、消化液液面が高くなったことに伴いスカムの厚さが各試験区で 1.5cm に減少した。40 日目に裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区において消化液液面を再度低下させた結果、スカムの厚さは再度増加し、裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区でそれぞれ 4.5cm、5.0cm となった。41 日目以降に再び消化液液面を高くしたことに伴い、粉碎区以外の全試験区においてスカムは完全に破碎された。粉碎区においては 42 日目にスカムが 1.5cm 残っていたが、翌日にはスカムが完全に破碎されていた。

以上のことから、泡切り攪拌羽根に消化液が浸る程度まで消化液液面の高さを高くすることによって、スカムが破碎されることが明らかになった。

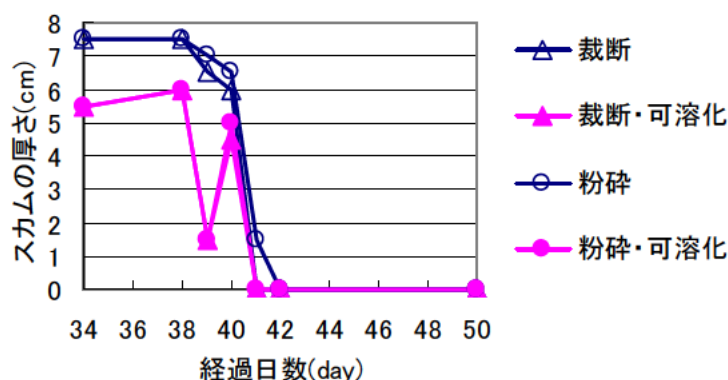


図 4-4 スカムの厚さの経時変化

4.3.2 発酵容積あたりメタンガス発生量

図 4-5 に 38 ~ 49 日目の発酵容積あたりメタンガス発生量の経時変化を示す。38 日目までは通常通りの投入・排出作業を行ったが、39 ~ 41 日目は消化液液面高さの上げ下げがあったため、メタンガス発生量が大幅に増加・減少している。49 日目の発酵最終日には、全試験区においてほぼ一定のメタンガス発生量に落ち着いた。

10 ~ 38 日目の各試験区の平均発酵容積あたりメタンガス発生量と比較し、裁断・可溶化区と粉碎・可溶化区の試験区において、消化液液面を高くした 39 日目にメタンガス発生量がそれぞれ 11 %、13 % 増加した。これは、スカムの破碎によりスカム中に残っていた未分解稲わらが分解されたことが要因であると推測される。

40 日目には原料の投入を行わなかったため、メタンガス発生量は全試験区で減少したが、41 日目に全試験区で消化液液面高さを高くし、原料の投入作業を再開したところ、裁断区と粉碎区においてメタンガス発生量が急激に増加した。しかし、対照区と対照・可溶化区においてメタンガス発生量がほとんど増加しなかった。49 日目の発酵最終日までメタンガス発生量は少しずつ回復したが、10 ~ 38 日目までのメタンガス発生量の平均値と比較し、49 日目のメタンガス発生量は対照区において 12 %、対照・可溶化区において 14 % 減少した。

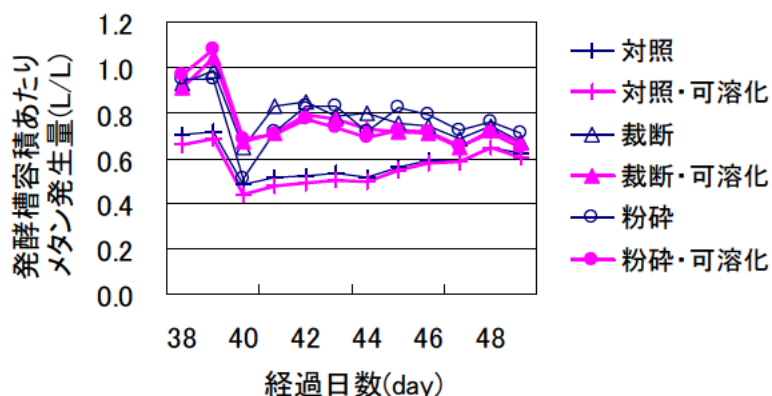
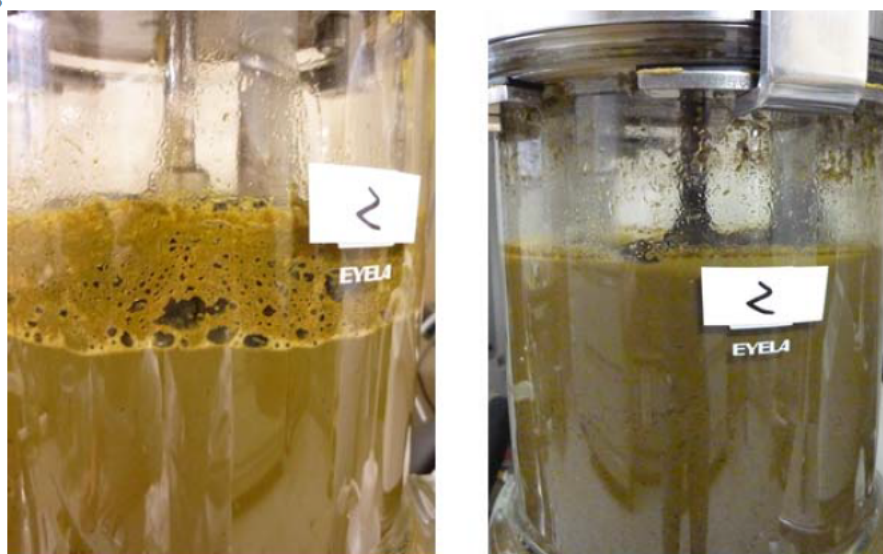


図 4－5 38～49 日目の発酵容積あたりメタンガス発生量の経時変化

図 4－6 に対照・可溶化区における 7 日目と 42 日目のスカムの写真を示す。対照・可溶化区においては 7 日目にスカムが堆積していた。対照区と対照・可溶化区においては連続発酵の全期間を通じて稲わらを投入しなかったが、生スラリーに含まれる固液分離し切れなかった敷き藁が少しずつ堆積した結果スカムが形成されたと考えられる。しかし、図 4－6(b)に示すように、42 日目には消化液の液面高さの調節に伴い完全破碎されたことが確認できる。

スカムの発生は消化液の均一化を阻害しメタンガス発生効率の低下や排管閉塞などの悪影響を引き起こすが、一方で、メタン生成菌などの菌群にとってはブロック（菌類の住処）の役割を果たしていると考えられる。スカムが完全破碎されたことによりブロックがなくなり、メタン生成菌の活性が弱まったことがメタンガス発生量の減少を引き起こしたと推測される。



(a) 7 日目 (b) 42 日目
図 4－6 対照・可溶化区のスカムの状況

図 4－7 に粉碎・可溶化区において 42 日目にガードの周囲に蓄積した稲わらを示す。

ガードとは、攪拌作業時に発酵槽内に乱流を起こし、より攪拌効率をあげるための金属製の枠である。稲わらを投入した全試験区において、図 4－7 のようにガード周辺に稲わらが蓄積した。このため、スカムの破碎により対照区と対照・可溶化区と同様にブロックがなくなることが危惧されたが、稲わらを投入した試験区においてはガード周辺に蓄積した稲わらがブロックの役割を果たしていると考えられ、消化液液面に生じたスカムを破碎したとしても、メタンガス発生量が維持もしくは増加することが推測される。

41 日目の原料投入の再開に際して、裁断・可溶化区、粉碎・可溶化区においては裁断区や粉碎区ほど大幅なメタンガス発生量の増加は見られなかったため、対照区や対照・可溶化区と同様にメタン生成菌の活性が弱まったことが危惧された。しかし、その後メタンガス発生量は増加し、42 日目には裁断区や粉碎区と同程度までメタンガス発生量が増加したことから、活性低下の可能性は否定された。そして、41 日目のスカム破碎によってメタンガス発生量が増加しなかったことから、41 日目の時点でスカム中に含まれる易分解性の未分解稲わらがほとんど分解されていたことが示唆された。

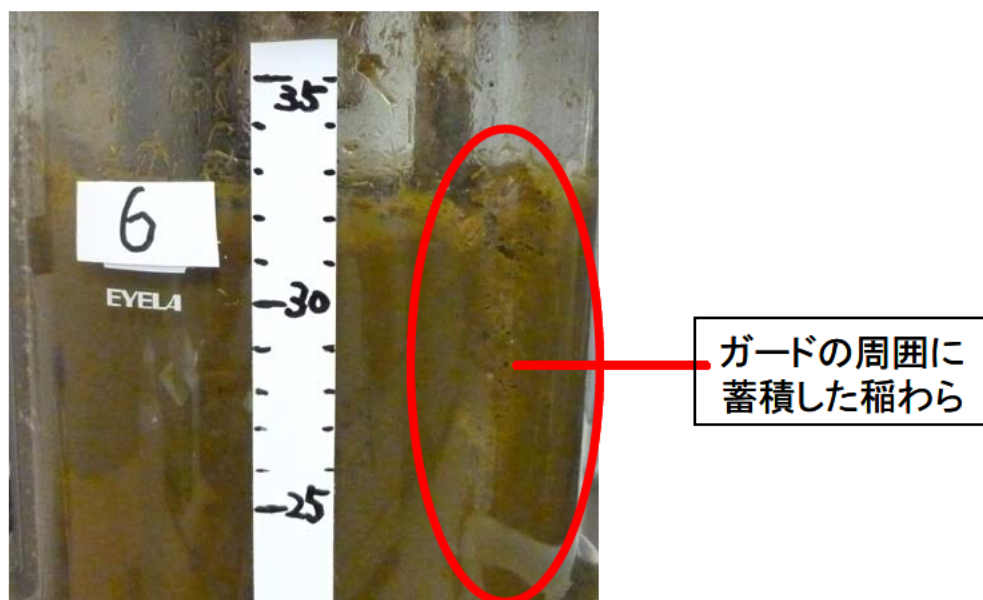


図 4-7 粉碎・可溶化区でガード周囲に蓄積した稲わらの状況

4.3.3 稲わら由来発酵容積あたり累積メタンガス発生量

表 4-2 に 10 ～ 38 日目と 39 ～ 49 日目における各試験区の稲わら由来発酵容積あたり累積メタンガス発生量を示す。10 ～ 38 日目までの時点では、裁断区と比較し、裁断・可溶化区、粉碎区、粉碎・可溶化区で累積メタンガス発生量がそれぞれ 11.7、10.5、18.9 %多かった。

しかし、41 日目にスカムを破碎し、49 日目まで稲わらを投入せずにさらに発酵を続けたところ、裁断区と比較し、裁断・可溶化区、粉碎区、粉碎・可溶化区においてそれぞれ 4.0、6.0、6.8 %メタンガス発生量が少ない結果となった。39 日目以降は各試験区で稲わらを投入しなかったことから、この値は各試験区でのスカム由来メタンガス発生量と捉えることができる。

表 4-2 10 ～ 38 日目と 39 ～ 49 日目における稲わら由来の発酵容積あたり累積メタンガス発生量

	10-38日目		39-49日目	
	合計CH ₄ 量(L)	裁断区との差(%)	合計CH ₄ 量(L)	裁断区との差(%)
裁断区(比較対照)	8.55	—	2.34	—
裁断・可溶化区	9.55	11.7	2.25	-4.0
粉碎区	9.45	10.5	2.20	-6.0
粉碎・可溶化区	10.16	18.9	2.18	-6.8

図 4－8 に、各試験区における裁断区とのメタンガス発生量の差の割合を示す。10－38 日目のメタンガス発生量の差のうち、スカム由来の差を 39－49 日目のメタンガス発生量の差と考えると、その他の要因における差は、裁断・可溶化区、粉砕区、粉砕・可溶化区の各試験区においてそれぞれ 7.7%、4.5%、12.1 %となる。裁断・可溶化区と粉砕区の差を加えると、およそ粉砕・可溶化区との差と等しくなる。

このグラフから以下のことが考えられる。

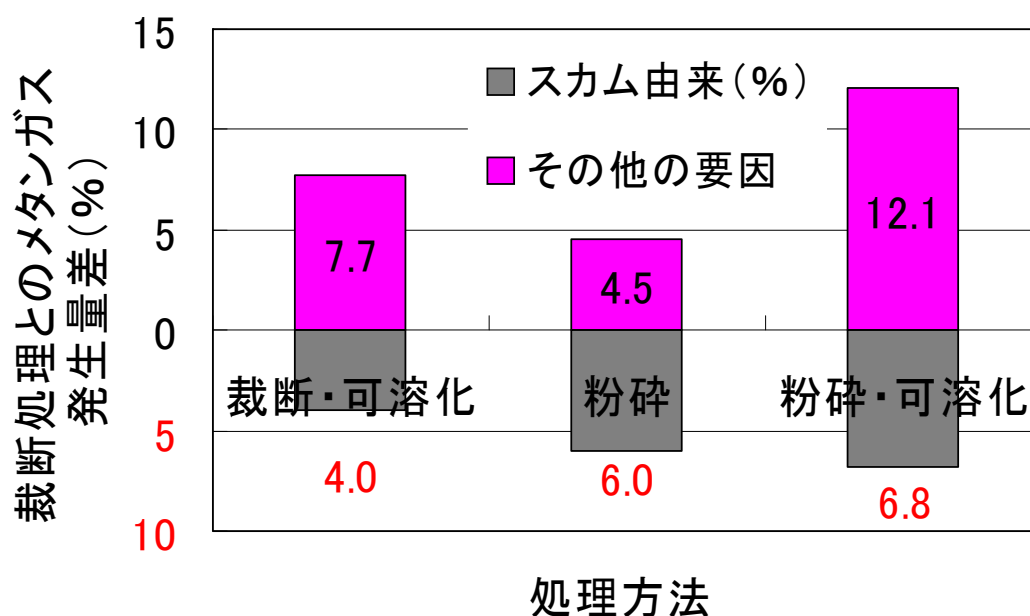


図 4－8 メタンガス発生量の裁断区との差の割合

(1) スカム中の有機物量や難・易分解性有機物割合の試験区間差

図 4－4 と図 3－7 で示したように、粉砕区と裁断・可溶化区及び粉砕・可溶化区との間にはスカム発生量に大きな差が生じた。しかし、スカム破碎後のメタンガス発生量の増減は、スカム発生量の増減と一致しなかった。このことから、スカム中に含まれる有機物量や難・易分解性有機物の割合が異なるため、必ずしもスカムを破碎することによってスカム発生量分のメタンガス発生量を望めないことがわかった。しかし、図 4－5 に示すように全試験区において、スカム破碎後にメタンガス発生量が急増していることから、超高温消化液可溶化処理によりスカム発生量が減少したことはメタンガス発生量に少なからず正の影響を及ぼしていると推測される。

(2) 超高温消化液可溶化処理による難分解性有機物の分解の可能性

既往研究では、超高温消化液可溶化処理はメタン発酵の初期段階である有機物の低分子化、可溶化段階を早める効果があるという考察にとどまっていたが、図 4－8 で示したように、超高温消化液可溶化処理を施した試験区において、スカム以外の要因で粉砕処理よりもメタンガス発生量を増加させる効果があることが示唆された。有機物の低分子化や可溶化はメタン発酵の序盤で行われる反応であり、40 日目以降の稲わらを投入していない 10 日間を踏まえた算出でもメタンガス発生量に差が生じるということから、易分解性の有機物の発酵を促進する以上の効果があると考えられる。つまり、セルロース等難分解性の有機物をより分解しやすい易分解性の有機物に分解する効果があると考えられた。

ただし、本研究ではメタン発酵の前後でのセルロース含有率などの分析を行っておらず、今後に残された課題である。

(3) 粉碎と超高温消化液可溶化の併用によるメタンガス発生量の増加効果が線形の関係にとどまること

図 4－8 より、裁断・可溶化区におけるその他の要因によるメタンガス発生量と粉碎処理におけるその他の要因によるメタンガス発生量の和が、およそ粉碎・可溶化区のその他の要因によるメタンガス発生量と同じ量であることがわかった。

図 4－9 に稲わら由来発酵容積あたり累積メタンガス発生量の経時変化を示す。38 日目まで全試験区でメタンガス発生量が一定の割合で増加し、39 日目に稲わらの投入を終了してからは各試験区において徐々にメタンガス発生量の増加率が低くなり、49 日目の発酵最終日には全試験区でほぼ一定のメタンガス発生量となって実験を終了した。このことから、各試験区間で稲わら由来累積メタンガス発生量の優劣が入れ替わらず、安定して差が広がっていくことがわかる。原料を投入してからメタンガスを発生させるまでの速度を速くすることによって、メタンガス発生量の絶対量の優劣を決定することが可能であることが考えられた。

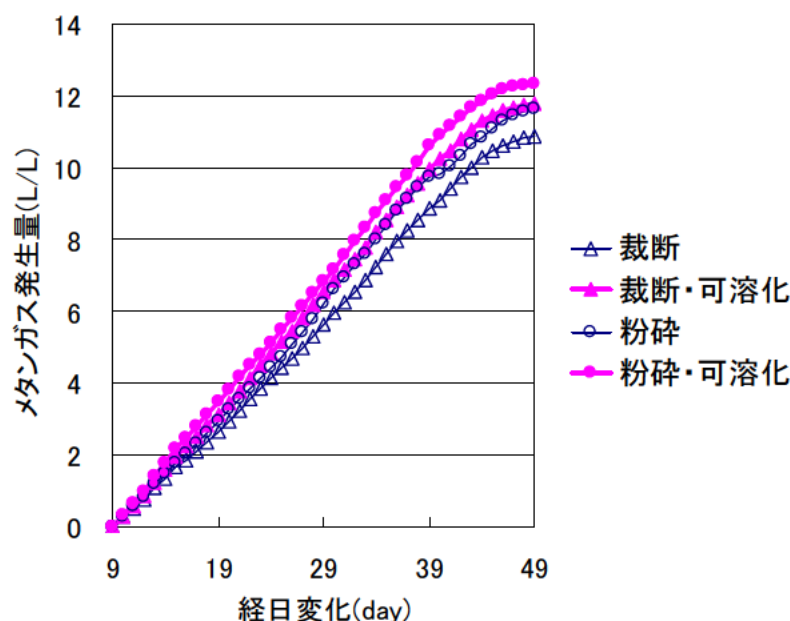


図 4－9 稲わら由来発酵容積あたり累積メタンガス発生量の経時変化

4.3.4 揮発性脂肪酸(VFA)

図 4－10 に揮発性脂肪酸の経時変化を示す。39 日目までの揮発性脂肪酸濃度は 3000 (ppm)程度で推移していたが、42 日目には各試験区において急激な低下が見られた。これは 40 日目に原料の投入を行わなかったことにより、それまで蓄積していた揮発性脂肪酸がメタン生成菌群により消費されたためである。42 日目にはバイオガス発生量が増加していることから、このことが裏付けられる。

また、対照区と対照・可溶化区において 45 日目以降に揮発性脂肪酸濃度が増加し対照区においては 4000 (ppm)に達した。これは、41 日目のスカムの破碎に伴いブロックがなくなりメタン生成菌群の活性が弱まったという仮説を支持する結果であると考えた。

一方、稲わらを投入した全試験区において、揮発性脂肪酸の上昇は見られなかった。これは、稲わらを投入した試験区においてガードの周囲に蓄積した稲わらがブロックの役割を果たし、消化液液面のスカムを破碎してもメタン生成菌群の活性が弱まらないという推測を支持する結果であると考えた。

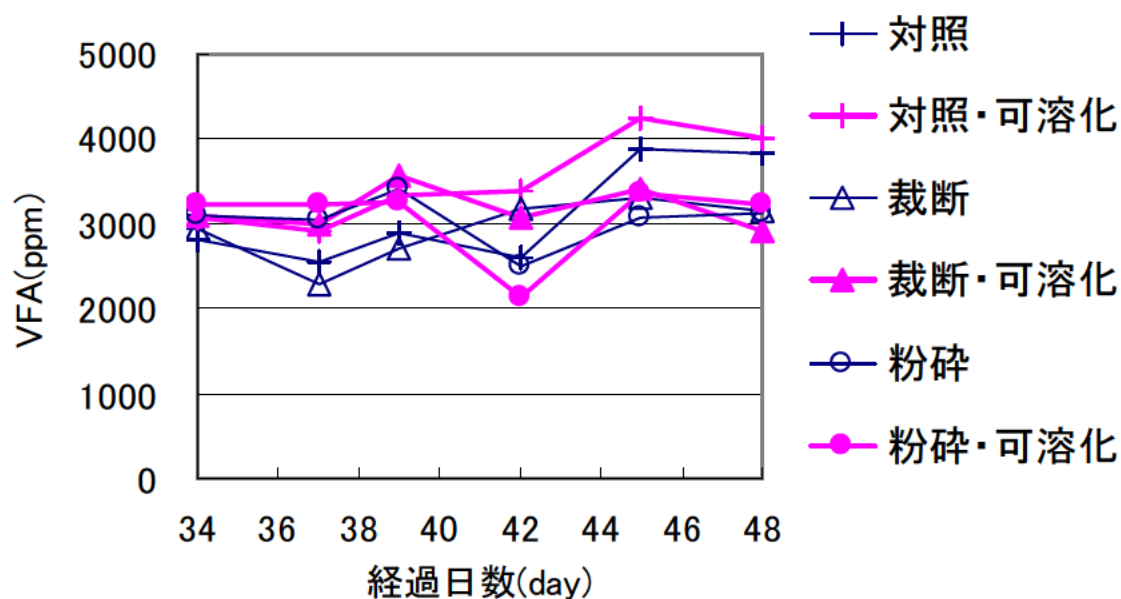


図 4 - 10 34 ～ 48 日目の揮発性脂肪酸の経時変化

4.3.5 アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)

図 4 - 11 にアンモニア態窒素濃度の 34 ～ 48 日目までの経時変化を示す。42 日目で粉碎区と粉碎・可溶化区でアンモニア態窒素濃度の低下が見られたが、45 日目以降には元の値に復帰した。粉碎処理を行った実験区のみで、そのような現象が生じた理由は不明である。その他の試験区においては、実験期間を通して、アンモニア態窒素濃度に大きな変動は見られなかった。

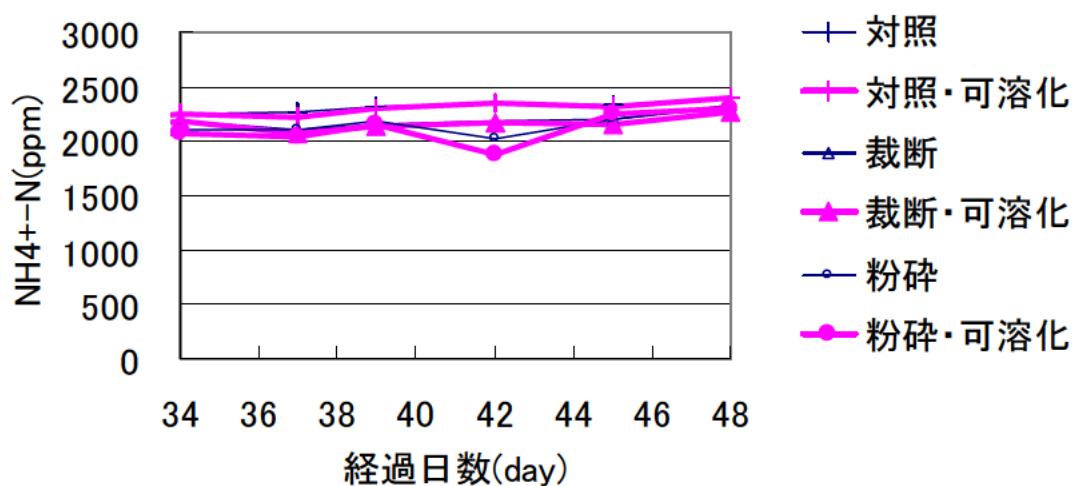


図 4 - 11 34 ～ 48 日目のアンモニア態窒素濃度の経時変化

4.3.6 pH

図4-12に1～48日目のpHの経時変化を示す。1日目からの連続試験全体の推移を見ると、pH7.6から8.3の範囲内で変動しており、変動幅はあるが、メタン発酵の適正なpHの範囲を逸脱しているものではない。明らかな実験区間差は認められなかった。

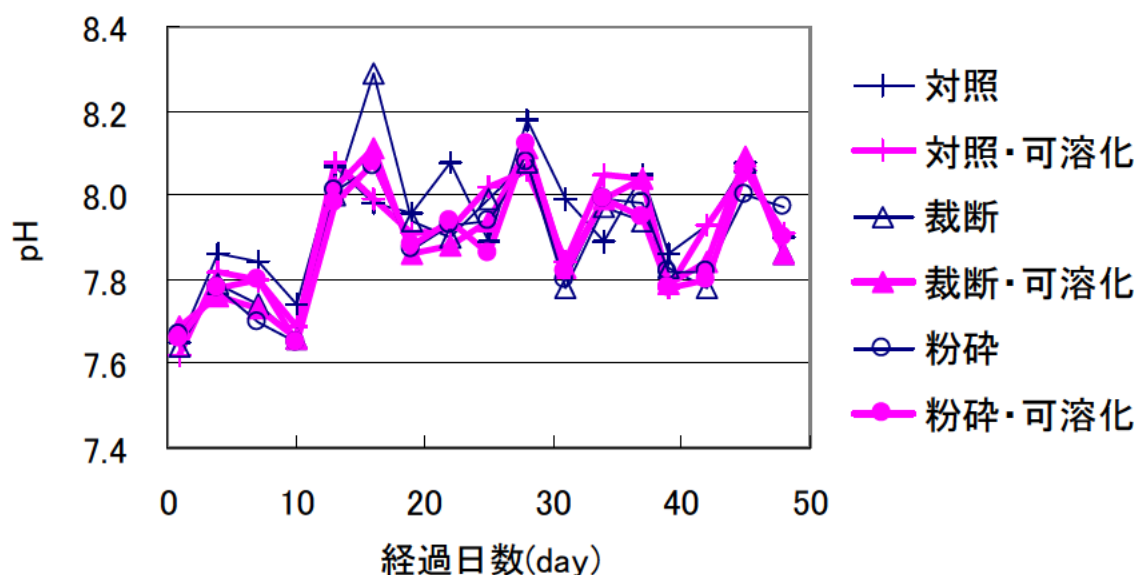


図4-12 1～48日目のpHの経時変化

4.4 まとめ

本章では以下のことが明らかとなった。

- (1) 消化液液面を泡切り攪拌羽根に浸すことによって、スカムを完全に破碎することが可能である。
- (2) スカムを破碎することによってメタンガス発生量が急激に増加したことから、スカム中には未分解稲わらが多く存在している。
- (3) スカムはブロックの役割を果たしていると考えられ、メタンガス発生に寄与している側面もある。したがって、消化液液面のスカムを破碎した場合に、スカムの代わりにブロックになりうるものが存在しない場合は、メタンガス発生量が減少する恐れがある。
- (4) スカム中に含まれる有機物量や難・易有機物割合は試験区間で差がある。
- (5) 超高温消化液可溶化処理によって、難分解性有機物が分解され易分解性有機物の割合が増加していると考えられた。
- (6) 粉碎と超高温消化液可溶化の併用によるメタンガス発生量の増加効果は線形の関係にとどまった。

また、今後の課題として、超高温消化液可溶化によってセルロースが易分解性有機物に分解されることを明確に検証する必要がある。

第5章 稲わらのバイオガス化とバイオエタノール化の熱量比較

5.1 はじめに

稲わらのバイオガス化とバイオエタノール化とで熱量比較をした報告はない。バイオガス化の可能性を探るためには、バイオエタノール化との比較によって第3章の連続メタン発酵実験の結果から、稲わらから得られるメタンガスの発生熱量を算出ことは可能である。また、本研究で供試した稲わらと同じサンプルを用いて、大成建設とサッポロビールがバイオエタノールの製造実証実験を共同で行っている。本論文の執筆段階ではエタノールの製造効率の成果が公開されていないが、エタノール生産目標値は定められており、エタノール生産目標値の発生熱量については算出することが可能である。

そこで本章では、メタンガスの発生熱量とエタノールの発生熱量を比較することで、稲わらのバイオガス化の可能性を探ることを本章の目的とする。

5.2 比較方法

5.2.1 規模の比較

供試材料は同じ産地の稲わらを用いたが、本研究とバイオエタノール製造実証施設とでは実験の規模が異なるため、始めに各々の実験規模を明らかにしておく。

(1) 本研究の実験規模

実験施設 : 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所資源保全チーム実験室内

実験期間 : 平成21年12月～平成22年1月

対象原料 : 稲わら（南幌町より収集）

メタンガス生産 : 稲わら 30g-wet/日 × 28日 × 4試験区 = 3.360kg-wet = 0.00336t-wet
⇒ メタンガス 226L/28日 = 2946L/年

図5-1に本研究の連続発酵実験の全景を示す。



図5-1 本研究の連続発酵実験施設の全景

(2) バイオエタノール製造実証施設の実験規模

実証地区名 : 北海道ソフトセルロース利活用プロジェクト
事業期間 : 平成 20 年 9 月～平成 25 年 3 月
実施主体 : 大成建設 (株)・サッポロビール (株) 共同実施
延床面積 : 235.00m²
対象原料 : 稲わら・麦わら (南幌町、長沼町より収集)
エタノール製造実証 : 稲わら 8t・wet/年⇒エタノール 1040L/年

図 5－2 にバイオエタノール製造実証施設を示す。



図 5－2 バイオエタノール製造実証施設

5.2.2 熱量比較の範囲

熱量の比較は原料稲わら 200kg (水分率 15 %) から生成可能なメタンガスの熱量と、同じく原料稲わら 200kg から生成されるバイオエタノールの目標生産量 26L を熱量ベースに換算した値とを比較する。生産熱量からは、原料の生産にかかるエネルギーや原料運搬にかかるエネルギー、また製造工程においてかかるエネルギーなどは差し引かれていない。よって、単位質量稲わらから生産可能な熱量ポテンシャルに限定した比較である。

5.2.4 エタノールの発生熱量算出方法

式 5 - 2 にエタノールの熱量算出式を示す。

$$E_E = 26 \times R_E \times R_J \times 10^{-3} \cdots \cdots (\text{式 5 - 2})$$

E_E [MJ/200kg 稲わら] $\cdots \cdots$ エタノールの発生熱量
 R_E $\cdots \cdots$ 単位エタノール体積あたり発生熱量
 R_J [kJ/kcal] $\cdots \cdots$ カロリーからジュールへの変換係数

表 5 - 2 エタノール熱量算出係数

記号	値
R_E [kcal/L]	5700
R_J [kJ/kcal]	4.187

5.3 結果と考察

5.3.1 本研究とバイオエタノール製造実証施設の規模比較

(1) 延床面積の比較

本研究は（独）土木研究所寒地土木研究所施設内の一室（約 40m²）を用いた研究であるが、一方でバイオエタノール製造実証施設の延床面積は 235.00m² であるため、バイオエタノール製造実証施設は本研究の約 6 倍の規模である。

(2) 投入稲わら量の比較

本研究では、1 試験区あたり 30g/日 × 4 試験区であるため、一日の稲わら投入量は 0.12kg である。一方、バイオエタノール製造実証施設は 8t-wet/年の投入であるため、平均すると一日あたり約 22kg の稲わら投入である。よって、バイオエタノール製造実証施設は本研究の約 183 倍の規模である。

本研究の連続試験は発酵性能が低下しない限界まで有機物負荷を高めた試験ではないため、一日あたりの稲わら投入量もバイオエタノール製造実証施設と比較してとても少ない。しかし、投入負荷を炭水化物の限界負荷である 2.4g (VS/L・day) まで高めたとしても、一日あたりの稲わら投入量は約 0.26kg であるため、バイオエタノール製造実証施設は本研究の約 84 倍の規模である。このことから、バイオガス化はバイオエタノール化に比べ、単位原料を消費するために必要な施設がより広く必要であると言える。

5.3.2 発生熱量比較

表 5 - 3 に同一産地から得られた原料稲わらから得られるメタンガスとエタノールの生産熱量を示した。

表 5 - 3 熱量生産ポテンシャル

	CH ₄ (裁断)	CH ₄ (粉碎・可溶化)	エタノール
生産熱量(MJ/200kg稲わら)	1441	1713	620
エタノール換算(L)	60	72	26
10aあたり生産熱量(MJ)	5131	6143	2350
乾物1tonあたり生産熱量(GJ)	8.5	10.1	3.6
エタノール比(倍)	2.3	2.8	-

稲わら（水分 15 %）200kg あたりの生産可能熱量は、メタンガスが 1441 - 1713 (MJ/200kg 稲わら)であり、エタノールの目標値は 620 (MJ/200kg 稲わら)である。

10a あたりの生産可能熱量は、5131 - 6143 (MJ)であり、エタノールの目標値が 2350 (MJ)である。また、乾物稲わら 1 トンあたりの生産可能熱量は、メタンガスで 8.5 - 10.1 (GJ)、エタノール目標値で 3.6 (GJ)である。

これらの結果から、単位原料稲わらあたりの生産可能熱量は、メタンガスがエタノールの目標値に比べ 2.3 - 2.8 倍も得られることが明らかになった。

稲全形（玄米、稲わら、籾殻）をエタノール化した場合に生産可能な熱量は 16.3 (GJ/dry-ton)と試算されている（環境省、2004）。本研究では、乾物 1 トンあたりの稲わら単独から生産されるメタンガスのエネルギーポテンシャルは 8.5 - 10.1 (GJ)と算出された。このことから、メタンガスは稲わら単独で稲全形から得られるエタノールの 2/3 の熱量を補うことが可能であり、バイオガス化によるエネルギー生産のポテンシャルが高いことを示した結果と言える。

5.4 まとめ

本章では、メタンガスの発生熱量とエタノールの発生熱量を比較することで稲わらのバイオガス化の可能性を探ることを目的とした。比較検討の結果、バイオガス化はバイオエタノール化と比較し、単位原料あたり 2.3 ～ 2.8 倍のエネルギーを生産可能であることが明らかになった。この結果は稲わらのバイオガス化の高いエネルギー生産ポテンシャルを示すものである。

一方で、延床面積比較ではバイオエタノール製造実証施設は本研究の実験規模の約 6 倍であり、投入稲わら量比較では約 183 倍の規模である。単位原料を消費するためにバイオガス化はバイオエタノール化よりも広大な土地と多大な施設が必要であると言える。

これらのことから、単位原料バイオマスから効率的にエネルギーを取り出すためには、バイオガス化が有効であることが示唆されたが、一方で、バイオガス化によってエネルギーを取り出すためにはバイオエタノール化よりも広く大きな施設が必要であることが示唆された。

第6章 総括

6.1 本研究の目的

本研究では、稲わらの長期保存形態として稲わらサイレージに着目し、稲わらサイレージの投入形態に対する家畜ふん尿のメタン発酵特性を明らかにすることを一つの目的とする。また、同産地から得られる原料を利用してバイオエタノール化と発生可能エネルギー比較を行い、バイオガス化の可能性を探ることを目的とする。

6.2 稲わらサイレージの投入形態に対する家畜ふん尿のメタン発酵特性 (第2章要約)

(1) 実験の目的

稲わらサイレージの投入形態に対するメタン発酵特性を明らかにするために、保存形態の違いから、稲わらのサイレージ化と家畜の残食投入を想定した腐敗サイレージの2条件及び投入処理方法の違いから、超高温消化液可溶化処理（以下、消化液可溶化）、粉碎処理の2条件の投入方法に対するメタン発酵特性を明らかにすることを目的とする。

(2) 結果

1) 有機物あたりメタンガス発生量

有機物あたりメタンガス発生量はサイレージ化、腐敗、消化液可溶化、粉碎のすべての単独処理において差が見られなかった。同じく、WCS わら区と腐敗 WCS わら区を比較し、有機物あたりメタンガス発生量に差はなかった。

一方で、消化液可溶化処理区間で比較すると、消化液可溶化と粉碎処理を併用することによって、メタンガス発生量がわら区において 114 %、サイレージ区において 53 %増加した。これらのことから、消化液可溶化と粉碎処理とを併用することによって、有機物あたりメタンガス発生量が増加することが示唆された。

2) 有機物分解率

全試験区で有機物分解率に差は見られなかった。

(3) 結論と課題

生わら区と稲わらサイレージ区、WCS わら区と腐敗 WCS わら区とでメタンガス発生量に差がなかったため、稲わらサイレージの長期投入と家畜の残食サイレージ投入への可能性が示された。

一方で、メタンガス発生量の増加が期待された消化液可溶化と粉碎処理については、期待されたメタンガス発生量の増加効果が見られなかったが、それらの併用処理によってメタンガス発生量の大幅な増加効果が確認された。

以上を踏まえ、長期発酵を想定して原料形態を稲わらサイレージに絞り、連続発酵実験等のより現実のプラントに近い発酵方法によって消化液可溶化や粉碎処理の効果について明らかにする必要がある。

6.3 稲わらサイレージに対する超高温消化液可溶化処理 及び粉碎処理が家畜ふん尿メタン発酵に与える影響 (第3章要約)

(1) 実験の目的

稲わらサイレージは生わらと同程度のメタンガス発生量を見込めることが明らかになった。また、消化液可溶化、粉碎の単独処理ではメタンガス発生量に差がなかったが、それらの併用処理によりメタンガス発生量が増加することが示唆された。本実験では、長期発

酵を想定して原料をサイレージのみに絞り連続発酵試験を行い、消化液可溶化や粉碎処理がメタン発酵に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

（２）結果

1)発酵容積あたりメタンガス発生量

発酵容積あたりメタンガス発生量の経時変化の結果から、対照区または可溶化対照区と比較し、稲わらサイレージを投入したすべての試験区で発酵容積あたりメタンガス発生量が32%以上増加した。

2)有機物あたりメタンガス発生量

① 消化液可溶化

有機物あたりメタンガス発生量の経時変化の結果から、裁断区と比較し裁断・可溶化区で有機物あたりメタンガス発生量は12%増加した。このことから、消化液可溶化を行うことによって有機物あたりメタンガス発生量を増加させられることが明らかになった。これは、消化液可溶化によって稲わら中に含まれる難分解性有機物であるセルロースやリグニン等の一部が分解され、メタンガス化されやすい易分解性有機物の割合が相対的に増加したことと、スカムの発生量が緩和されたことが要因であると考えられる。

② 粉碎処理効果

裁断区と比較し粉碎区で有機物あたりメタンガス発生量が11%増加した。このことから、稲わらサイレージを粉碎処理することによって、投入稲わら有機物あたりメタンガス発生量が増加することが明らかになった。これは、粉碎処理によって消化液が稲わらに触れる表面積が増加し、稲わらが分解されやすくなったことが要因であると考えられる。

③ 消化液可溶化と粉碎の併用処理効果

裁断区と比較し、粉碎・可溶化区において有機物あたりメタンガス発生量が19%増加した。このことから、粉碎と消化液可溶化を併用することによって、メタンガス発生量が増加することが明らかになった。

3)スカムの発生量

16日目以降は全試験区において消化液液面に厚さ4～8cmのスカムが形成されたが、可溶化が施されている試験区は可溶化を施していない試験区と比較しスカムの発生量が緩和された。スカムは稲わらが液面近くに浮かび上がることによって形成されており、スカム中には未分解稲わらも含まれていると推測された。そのため、消化液可溶化によりスカムの形成を抑えられたことにより、メタンガス発生量が増加したと考えられる。

4)有機物分解率

有機物あたりメタンガス発生量において19%の差が生じた裁断と粉碎・可溶化の2試験区において、有機物分解率の差がなく、またメタン発酵の中間生成物である揮発性脂肪酸にも差はなかったため、稲わらの排出不良の可能性が考えられる。本実験で用いた発酵槽の引抜口直径 2cmに対して、稲を裁断する長さが 2cmでは長すぎて排出しづらく、排出口直径の1/4の長さである0.5cmに粉碎することによって、稲わらの排出が滑らかに行われることが示唆された。

（３）結論と課題

連続試験において、稲わらサイレージを投入することによって、対照区に比べ発酵容積あたりメタンガス発生量が 32 %増加し、消化液可溶化と粉碎処理の併用処理によって、裁断区に比べ 19 %増加した。

粉碎処理においてメタンガス発生量が増加する要因は、稲わらサイレージの表面積が広がることであると考えられるが、消化液可溶化については、スカム発生量が緩和されたことと、セルロース等の難分解性有機物が分解され、易分解性有機物の割合が相対的に増加するという2つの要因が考えられるが、本実験では結論は得られなかった。

6.4 スカムの発生量がメタン発酵に与える影響

(第4章要約)

(1) 実験の目的

第4章の連続発酵試験において、消化液可溶化によるメタンガス発生量の増加効果の要因について2つの仮説が考えられ、1つはスカム発生量が緩和されたことであり、もう1つはセルロース等の難分解性有機物が分解され、易分解性有機物の割合が相対的に増加したのではないかとする仮説である。

そこで本章では、消化液の投入・排出量を調整することによって消化液の水位を調節し、スカムを破碎させることを試みた。スカムを破碎させた後に、消化液可溶化を施した試験区と施していない試験区のメタンガス発生量を比較し、消化液可溶化によるメタンガス発生量増加の要因がスカム発生量の減少によるものであるかどうかを明らかにすることを、本章の目的とする。

(2) 結果及び結論

本章では以下のことがわかった。

- 1) 消化液液面を攪拌羽根最上部の泡切り攪拌羽根に浸すことによって、スカムを完全に破碎することが可能である。
- 2) スカムを破碎することによってメタンガス発生量が急激に増加したことから、スカム中には未分解稲わらが多く存在している。
- 3) スカムはフロックの役割を果たしていると考えられるため、消化液液面以外にスカムの代わりにフロックになりうるものが生じない場合は、メタンガス発生量が減少する。
- 4) スカム中に含まれる有機物量や難分解性・易分解性の有機物割合には、試験区間に差がある。
- 5) 消化液可溶化によって、難分解性有機物が分解され易分解性有機物の割合が増加している可能性がある。
- 6) 粉碎と消化液可溶化の併用によるメタンガス発生量の増加効果は線形の関係にとどまる。

(3) 今後の課題

消化液可溶化の効果は、セルロース構造を崩して易分解性有機物に分解していることと考えられるが、その詳細を検証する必要がある。

6.5 稲わらのバイオガス化とバイオエタノール化の熱量比較

(第5章要約)

(1) 実験の目的

本章では、メタンガスの発生熱量とエタノールの発生熱量を比較することで稲わらのバイオガス化の可能性を探ることを目的とした。

(2) 結果と結論

比較検討の結果、バイオガス化はバイオエタノール化と比較し、単位原料あたり2.3～2.8倍のエネルギーを生産可能であることが明らかになった。この結果は、稲わらのバイオガス化が高いエネルギー生産ポテンシャルを持つことを示すものである。

一方で、実験・実証施設の延床面積比較では、バイオエタノール製造実証施設は本研究の実験規模の約6倍であり、投入稲わら量比較では約183倍の規模であった。単位原料を消費するために、バイオガス化はバイオエタノール化よりも広大な土地と重厚な施設が必要であることが明らかになった。単位原料バイオマスから効率的にエネルギーを取り出すためにはバイオガス化が有効であることが示唆されたが、一方で、バイオガス化によってエネルギーを取り出すためにはバイオエタノール化よりも広く大きな施設が必要であることが示唆された。

6.6 本研究の結論と今後の課題

バッチ試験において、生わらと稲わらサイレージ、WCS わらと腐敗 WCS わらとでメタンガス発生量に差がなかったため、稲わらサイレージの長期投入と家畜の残食サイレージ投入が可能であることが示唆された。また、連続試験において、稲わらサイレージを投入することによって、対照区に比べ発酵容積あたりメタンガス発生量が 32 % 増加し、消化液可溶化と粉碎処理の併用処理によって、裁断区に比べメタンガス発生量が 19 % 増加した。バイオエタノール製造実証施設の生産目標と本実験で得られた取得可能熱量の比較においては、単位原料あたり最大で 2.8 倍の熱量のメタンガスを発生可能であることが認められた。

また、連増試験において、全試験区でスカムが多く発生したが、消化液の液面高さを泡切り攪拌羽根に浸る高さまで高めることによってスカムを完全破碎することができ、そのことにより、メタンガス発生量が増加することが期待できることがわかった。ただし、対照区では、スカムが微生物のフロックの役割をしているためと考えられ、消化液液面のスカムを破碎することによってメタン生成菌群の活性が弱まり、逆にメタンガス発生量が減少することが示唆された。稲わらを投入する試験区では、稲わらがガード（乱流棒）に堆積することによって生成した稲わら塊がフロックの役割を果たすことが示唆されたため、スカムの破碎がメタン生成菌群の活性の弱まりを生じることはないと考える。

以上より、バイオガス化によって稲わらをエネルギー取得のために有効利用できることが明らかになった。バイオガス化の際には、稲わらをサイレージ化し、消化液可溶化と粉碎処理を併用することによって、単位原料あたりではバイオエタノール化と比べてより効率よくエネルギーを取得できることが明らかになった。

今後の課題として、以下に挙げるような研究を進めていくべきであると考ええる。

- (1) より厳密な稲わらサイレージの投入方法について検討し、実用プラントに近い規模での発酵の研究を進めるべきである。
- (2) セルロース系の難分解性の有機物が消化液可溶化で分解されるメカニズムについてより詳しく検証を進め、消化液可溶化を現場で導入するべきかどうかを結論付けるべきである。
- (3) 本研究のバイオガス化とバイオエタノール化との熱量比較は、目標値との比較にとどまった。今後バイオエタノール化の実験値が公表された際には、再度 EPR (Energy Payback Ratio) 等の評価方法により、総合的にエネルギー評価を進め、未利用セルロース系バイオマスの有効活用に向けて研究を進めるべきである。
- (4) 本研究のメタン発酵は、牛ふん尿スラリーを主体とする消化液を扱ったが、稲わらのバイオガス化を推進していくために、牛ふん尿以外を主原料とするメタン発酵への稲わらサイレージの投入効果についての研究を進めていくべきである。

参考文献

- (1) Andrew Hashimoto. G, 1989, Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and production rate from straw , Biological Wastes 28 p 247-255
- (2) A. Lehtomaki, S. Huttunen, T. M. Lehtinen, J. A. Rintala : Anaerobic Digestion of grass silage, in batch leach bed processes for methane production
- (3) B. Berg & C. McClaugherty, 大園享司訳 森林生態系の落葉分解と腐植形 Plant Litter Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration
- (4) 内田仙二編 サイレージ科学の進歩
- (5) Ghosh. A, 1999, Bhattacharyya. B. C, Biomethanation of white rotted and brown rotted rice straw , Bioprocess Engineering 20 p 297-302
- (6) Heinz and Barbara, 2002, バイオガス実用技術(初版) オーム社, 17-18
- (7) 井尻勉, 2009, 自走細断型飼料イネ専用収穫機の開発
- (8) Kalra. M. S Panwar. J. S , 1986, Anaerobic digestion of rice crop residues , Agricultural Wastes 17 p 263-269
- (9) 環境省 産業廃棄物の排出及び処理状況(平成 18 年度実績) などについて Accessed Jan. 31, 2009 <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=10572>
- (10) 環境省 <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g50418b02j.pdf>
- (11) 経済産業省エネルギー資源庁 エネルギー白書 2008 <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/index.html>
- (12) 松田従三 バイオガスプラントの課題・特に北海道の家畜ふん尿用プラントについて
- (13) 溝田陽子, 千葉裕之, 四本端世, 大島, 義徳, 山本縁, 大林組メタン発酵における超高温可溶化処理の有効性評価手法, 2008
- (14) 溝田陽子, 千葉裕之, 四本端世, 大島義徳, 山本縁, メタン発酵における超高温可溶化処理の有効性評価手法, 第 19 回廃棄物学会発表会講演論文集 2008 B3-3
- (15) 中村一夫, 酒井伸一, 堀寛明, 春木裕人, 宍田健一, 岩崎大介, 久堀泰佑, 坪田潤, 京都高度技術研究所, 京都市環境局, 京都大学, 株式会社タクマ, 大阪ガス株式会社, 京都バイオリサイクルプロジェクト高効率メタン発酵技術
- (16) ナタネを原料としたバイオディーゼル燃料の小型ディーゼル機関への適用
- (17) 中川正悟, 2009, 家畜ふん尿メタン発酵における副資材としての水稻の投入効果
- (18) 中久保亮, 2004 家畜ふん尿のメタン発酵における副資材投入の最適化

- (19) 中久保亮,2009,家畜ふん尿のメタン発酵における副資材の発酵特性に関する研究
- (20) 名久井忠ら (2008)稲ホールクロップサイレージの調製と資料価値の評価
- (21) 日本エネルギー学会 バイオマスハンドブック (2002)
- (22) 野池達也編著 メタン発酵
- (23) 農水省 2009http://www.maff.go.jp/j/tokei/sokuhou/kouti_09/index.html
- (24) 農林水産技術会議－新たな用途をめざした稲の研究開発(平成 18 年度版), p9,
http://www.s.affrc.go.jp/docs/report/report18/no18_p9.ht
- (25) 農林水産省 飼料をめぐる情 (2009)
http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/index.html
- (26) 農林水産省 畜産環境対策
<http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/index.html>.
- (27) 農林水産省 平成 20 年度土壌由来温室効果ガス発生抑制システム構築事業の実施について
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_topics/h20_dozyo_yurai.html
- (28) Oda. A , Sakata. Y , Oida. A , Reuse of fibrous agricultural biomass for energy resources by methane fermentation , Greenhouse Gases and Animal Agriculture (2002) p 243-246
- (29) 折笠貴寛, 徳安健, 井上貴至, 小島浩司, ロイ ポリトシュ, 中村宣貴, 椎名武夫 (2009), 稲わら由来のバイオエタノール生産におけるエタノール変換効率の違いがコスト, CO₂ 排出およびエネルギー収支に及ぼす影響
- (30) Pathak .B. S et al , Biogasification of cattle dung and cattle dung-rice straw mixture at different solid concentrations , Agricultural Wastes 13 (1985) p 251-259
- (31) Scherer. P. A, Vollmer. G-R. , Fakhouri T. Martensen. S , Development of a Methanogenic Process to Degrade Exhaustively the Organic Fraction of Municipal “ Grey Waste” under Thermophilic and Hypertherm Ophilic Conditions, Water. Sci. Technol., Vol41,No.3 p 83-91
- (32) 志頭博克, 橘保宏, 川出哲生(2009) : 汎用型飼料収穫機による WCS 用イネの収穫調製
- (33) Somayaji.D Khanna.S , Biomethanation of rice and wheat straw , World journal of microbiology & biotechnorogy 10 p 521-523 (1994)
- (34) ThomasAmon,BarbaraAmon,VitalityKryvoruchko,Werner ,Zollitsch,KArI Mayer, Leonhard Gruber,Biogas production from maize and dairy cattle manure - influence of biomass,composition on the methane yield (2007)

(35) 坪田潤・局俊明・菅原正孝・濱崎竜英・津野洋 生ごみの生物学的超高温可溶化とそのメタン発酵への利用 廃棄物学会誌 Vol.18 No.4 p 240-249 (2007)

(36) 坪田潤・黒木浩二・洪鋒・千智勲・津野洋 乾式メタン発酵法への生物学的超高温可溶化技術の適用性の検討 廃棄物学会 Vol.19 No.4 p 265-274 (2008)

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.421 March 2011

編集・発行 © 独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046