

# 廃菌床のメタン発酵における前処理としての蒸煮・爆砕処理の影響

浅野憲哉\*1・駒形江美\*2

Effect of Steaming and Explosion Treatment as Pre-Treatment  
on Methane Fermentation of Mushroom Culture Waste.

ASANO Kenya and KOMAGATA Emi

Mushroom culture waste was used for methane fermentation and which waste is regional and unique in Nagano Prefecture. In generally, mushroom culture wastes are poor biodegradable which contains huge number of cellulose and lignin. We used 100mL serum vials as methane fermentation batch reactor and used anaerobic sludge biodegraded for food wastes as inoculum. Methane fermentation was carried out using an untreated sample and a sample with pressure extrusion treatment by an extruder. At this time, a methane yield of 234 ml-CH<sub>4</sub>/g-VS was obtained from the untreated sample, and a 238 ml-CH<sub>4</sub>/g-VS was obtained from the pre-treated sample. Significant improvement in methane yield was not observed.

キーワード：地域由来バイオマス，メタン発酵，キノコ廃菌床

## 1. バイオマス政策の現況

産業革命以降，石炭等の化石燃料の消費が増えたことや，近年の世界的な近代化による産業の発展に伴い，地球規模で炭酸ガス等の温暖化ガス発生を抑制する必要性について，具体的な数値目標を伴い活発に議論されるようになった。

国連の2030年に向けた持続可能な開発目標(SDGs)には目標(Goal)13として気候変動とその影響に立ち向かうため緊急対策を取ることが盛り込まれているが，世界でも温暖化対策の調査や取り組みが盛んに勧められている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)がまとめた1.5°C特別報告書によると，工業化以前の地球と比較して現時点で温室効果ガスにより平均気温が1.0°C程度上昇したと考えるのが妥当であり，このままいくと2030年から2052年のあたりで平均気温は1.5°C上昇し，野生生物種の絶滅速度が現在より加速して農作物への悪影響も増加して食糧生産が減少すると考えられている。IPCCは更に，これらの対策が不十分だと平均気温は2.0°C上昇して，干ばつや野生生物絶滅等の被害が更に拡

大すると予想しているため，炭酸ガス排出量を2050年までに「正味ゼロ」にする必要性を訴えている。<sup>1)</sup>

バイオマス活用推進基本法が2009年に制定され，これに基づいてバイオマス活用推進基本計画が2010年に閣議決定され，温暖化防止，循環型社会形成，農山漁村活性化，バイオマスの種類ごとの特性に応じた利用，エネルギー供給源の多様化等の基本視点から，総合的で効果的なバイオマス活用推進を地域が主体となって活性化につなげていくことが求められ，この具現化に向けて2012年には関係7府省（内閣府，総務省，文部科学省，農林水産省，経済産業省，国土交通省，環境省）が共同でまとめたバイオマス事業化戦略が策定された。<sup>2)</sup>

バイオマスには大きく分けて廃棄物系，未利用系および資源作物系があるが，国内の年間発生量や利用率は様々である。2010年度に閣議決定された新たなバイオマス活用推進基本計画では，バイオマス利用量の炭素換算値の目標値26 M ton-Cの達成に向けて廃棄物系および未利用系バイオマスの2025年度の目標値を見直している。年間約17 M ton発生している食品廃棄物について，現状の食品関連事業者による飼料や堆肥利用を中心とした24%の利用率をさらに推進させ，分別が難しいとされる食品流通の末端での利用向上を目指し，メタン発酵によるバイオガ

\*1 環境都市工学科 准教授

\*2 環境都市工学科 学生

原稿受付 2019年5月31日

ス生産を促進して目標年度の 2025 年度には利用率 40%を目標値として掲げている。下水汚泥は年間発生量が 78 M ton と廃棄物系バイオマスの中でも特に多いが、これについてもメタン発酵によるガス化や固形燃料化を促進して、現状の利用率 63%程度から 85%程度にまで向上させることを目指している。<sup>2)</sup>

## 2. 研究背景

長野県はキノコ生産が盛んであるが、特に菌床で栽培されるエノキタケ、ブナシメジ、エリンギの生産量はそれぞれ年間約 50,000 ton, 32,000 ton, 3,900 ton となっており、いずれも全国一位の生産量を誇る。キノコの菌床には、おが屑やコーンコブが主原料として使用されており、成長を促す目的で米ぬかや小麦ふすまが混合されている。通常は一回の収穫ごとに使い捨てられるもので、そのためキノコの菌床栽培に伴いキノコ収穫量と同程度の使用済み菌床が含水率の高い廃棄物として発生する。<sup>3,4)</sup>

廃菌床の利用方法は、一部を家畜飼料に混合して活用する試みがあるものの、一般的には開放系施設で単純な堆肥化が施されるケースが多く、堆肥化過程で悪臭が発生してしまったりメタンガスが大気中に放出されている恐れがある。

ここで廃棄物系バイオマスである廃菌床をメタン発酵することで、廃棄物の減量化と同時に再生エネルギーであるバイオガスのメタンガスが回収できることが期待されており、実プラントでの試験的なメタン発酵の取り組みも始まっている。発酵により回収したメタンガスをエネルギーとすることで、エネルギーの地産地消にもなり、持続可能な社会を実現にもつながっていく。

しかし、おが屑由来廃菌床の原料である木材には、主に難分解性のリグニン(18-35%)と炭水化物(65-75%)といった複雑な高分子化合物が含まれていて、この場合の炭水化物も難分解性のセルロース(40-50%)とヘミセルロース(25-35%)である。<sup>3,5)</sup>

また、近年菌床原料として利用割合が増加しているコーンコブ(トウモロコシの芯)についても、一般的な主成分がセルロース約 34%、ヘミセルロース約 31%、リグニン約 18%、灰分等約 17%という報告があり、おが屑同様に難分解性の成分が含まれると考えられる。

このため、こうした原料をメタン発酵する際には、一般的には微細化や可溶化の段階を促進するための前処理が必要となる。

蒸煮爆砕処理とは、試料を高温高压条件においた後に急激に常温常圧条件にすることで、水蒸気の膨張により有機物組織を微細化し、難分解性のセルロースなどを溶解性のある糖分等へと変容させる処理である。

一般的な蒸煮爆砕処理では、キノコ廃菌床を圧力釜の中で 180~230℃の水蒸気で適当な時間処理した後、瞬時にバルブを開けてチップを水蒸気とともに釜から放出・爆砕する方法がとられる。

著者らは過去の研究で、回分式の蒸煮爆砕装置でキノコ廃菌床を前処理をしたところ、メタン発酵の収率が向上する知見を得たが、実用化のためには連続的な前処理が必要である。これに対し、エクストルーダー(押出成形機)は食品加工等に利用されており、圧縮、粉砕、発熱、溶融、押出、成形、膨化の一連の過程が連続的に実施できるとされている。

本研究では、長野県内で発生したキノコ廃菌床に対しエクストルーダーによる間接的な蒸煮爆砕の前処理を実施し、実験室規模のメタン発酵の実験を行い、嫌気性菌叢による処理特性とメタン発酵の効率を調査した。

## 3. 研究方法

### 3-1 実験材料および植種

試料として、長野県内のキノコ生産工場より入手したキノコ廃菌床を用いた。対照用試料は直ちに凍結保存し、爆砕試料はエクストルーダーによる圧縮押出処理をしたのち凍結保存した。

廃菌床の飼料特性を図 1 に示す。水分は未処理試料で約 60%に対し、エクストルーダーによる蒸煮爆砕処理を実施した試料は約 71%となった。蒸発残留物(TS)および強熱減量(VS)の比率も水分に伴い未処理試料で多くなったが、TS に占める VS の割合は未処理試料で 0.88 に対して蒸煮爆砕試料で 0.91 と顕著な違いは見られなかった。

植種に用いた種汚泥の嫌気性細菌叢として、新潟県内で中温嫌気性消化により厨芥の堆肥化を実施している施設の消化汚泥を、常温で 1 年以上静置したものを用いた。

表 1 試料特性

	TS(%)	VS(%)	VS/TS	水分 (%)
未処理	39.7	34.8	0.88	60.3
蒸煮爆砕処理	28.7	26.2	0.91	71.3

### 3-2 メタン発酵回分実験および測定項目

各試験区における種汚泥の種類および使用量、投与した原料となる基質性状および VS 基準での負荷率について、表 1 に示す。メタン発酵の回分実験は 120mL の血清バイアルを用いて 35°C の震盪培養器にて行った。各試験区毎のバイアルへ消化汚泥と菌床試料を供給し、脱塩水により液相容積を 80mL へ調整し、ブチルゴム栓で塞いでアルミシールをした。

試験区として、基質を添加せずに種汚泥のみで培養した対照区としての Run1、未処理試料をそれぞれ 2.0 g-wet および 5.0 g-wet 添加した Run2 と Run3、エクストルーダーで爆砕処理した試料を同量ずつ添加した Run4 と Run5 を用意した。

バイオガスの生成量は、ガラス製シリンジを水平にした状態でブチルゴム栓より気相部へ針を挿入して、大気圧で完全に膨張させることで測定した。バイオガスに占めるメタンガス濃度は TCD-ガスクロマトグラフ(Shimadzu GC-8A)にて測定した。ガスクロマトグラフのカラムにはステンレスカラムを、充填剤には Molecular Sieve 5A 60-80mesh を、キャリアガスにはアルゴンガスを用いた。また、カラムの温度は 140°C とし注入温度および検出温度は 160°C とした。

## 4. 結果および考察

培養開始から 137 日間にわたる各試験区ごとの累積メタンガス生成量を図 1 に示す。何れの試験区も培養日数が 20~30 日目付近で最大メタン生成速度となり 50 日目以降は緩やかになった。

ガス生成の概ね停止した 137 日目のガス生成量と VS 当たりメタンガス収率を表 3 に示す。廃菌床を添加せずに種汚泥のみで培養した Run1 でのメタン生成量が 10ml であったが、これは種汚泥に含まれる有機物からのメタン生成であるため、添加した廃培地由来のメタン生成量を算出するときは各試験区の累積メタン生成量より差し引いて補正した。

また、Run2~5 の試験区への廃菌床の添加量は湿重量で 2.0g または 5.0g であったが、未処理試料と爆砕試料とで発酵開始時の VS 濃度が異なる。メタン収率の算出の際は一般的に VS 添加量を基準に求めるため、本研究でもこれに倣った。<sup>9)</sup>

メタン収率は Run2, 3, 4, 5 でそれぞれ 274, 234, 226, 238 ml-CH<sub>4</sub>/g-VS となり、Run3 と Run5 で概ね近い値となったものの Run2 が高め、Run4 が低めの値となった。

一般に、キノコ廃菌床にはおが屑片やコーンコブ片が残留したり、石突き片が混入しているが、未処理の場合は特にこれらが微細化を受けずに含まれている。Run2 や Run4 のように使用する基質量が少ない場合には、このような小片が多くまたは少なく採取されると、メタン収率収率が影響を受けて誤差として表れやすい。こうした試料採取量の誤差はホモジナイザーによる微細化で一般には解決する。難分解性基質のメタン発酵における微細化過程は、発酵速度やメタン収率に影響のある重要な律速プロセスであり、本研究のような前処理効果を調査する研究では、こうした誤差を抑えるのが困難である。そのため、試料添加量が比較的多い Run3 および Run5 を代表値として採用するのが妥当である。これを踏まえて Run3 と Run5 のメタン収率を比較すると、それぞれ 234 と 238 ml-CH<sub>4</sub>/g-VS であり、メタン収率に対する前処理の効果が殆ど確認できなかった。

表 3 キノコ廃培地メタン発酵のメタン収率

Run No.	メタン生成 [ml-CH <sub>4</sub> ]	VS 投与量 [g-VS/vial]	メタン収率 [ml-CH <sub>4</sub> /g-VS]
1	0	-	-
2	196	0.70	274
3	418	1.74	234
4	118	0.52	226
5	317	1.31	238

表 2 バイアル瓶の内容物

試験区 Run No.	投入廃菌床 (g-wet)		種汚泥投与量 (ml)	脱塩水投与量 (ml)	液相合計容積 (ml)	VS 負荷率 (g-VS/L)
	未処理試料	前処理試料				
1	-	-	60	20	80	-
2	2.0	-	60	18	80	8.7
3	5.0	-	60	15	80	21.8
4	-	2.0	60	18	80	6.6
5	-	5.0	60	15	80	16.4

難分解性のセルロース含む基質を対象とした中温メタン発酵におけるメタン収率の報告例を表4に示す。牛ふん尿のメタン発酵の報告では、中久保らが本研究と近い230 ml-CH<sub>4</sub>/g-VSの収率を得たのに対して、櫻井らが315 ml-CH<sub>4</sub>/g-VSの収率を報告しており、同様のバイオマスでも基質の由来ごとにある程度の幅があることがわかる。<sup>7)8)</sup>

製紙スラッジをルーメン液で前処理してメタン発酵したS.Takizawaらのメタン収率は本研究に近い値であったが、トウモロコシわらを対象に実施したM.Cieslikらの結果と比較するとやや劣るものとなった。<sup>9)10)</sup>この理由には、キノコ菌床の原料にコーンコブが多く用いられているものの、キノコ栽培の際に比較的分解しやすい成分が菌体に吸収されているため、廃菌床は元の状態よりも生物分解性が低下したことも要因となっている可能性がある。しかし、他の原料より収率が劣るものの、キノコ廃菌床からは牛ふん尿やトウモロコシ藁等と同等のメタン回収が期待できることが本研究より明らかとなった。

### 5. まとめ

長野県由来のキノコ廃菌床について未処理のもの、エクストルーダーによる爆砕処理したものとをメタン発酵の回分実験に供した。投与したVS量当たりのメタン収率はそれぞれ234ml-CH<sub>4</sub>/g-VSと238ml-CH<sub>4</sub>/g-VSとなり、顕著な違いは確認されなかった。キノコ廃菌床は、牛ふん尿や製紙スラッジ等の類似した難分解性バイオマスに近いメタン回収率が得られ、地域由来バイオマスとしての利活用が期待できることが明らかとなった。

### 参考文献

- 1) (公財)地球環境戦略研究機関(IGES),「IPCC1.5°C特別報告書ハンドブック」,  
<<https://pub.iges.or.jp/pub/ipcc1.5handbook>> (2019年5月参照)
- 2) 農林水産省「バイオマス活用推進基本計画」(2016),  
<<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/index-4.pdf>> (2019年5月参照)
- 3) 有機質資源化推進会議 編:「有機廃棄物資源化大事典」, 社団法人農山漁村文化協会(1997)
- 4) 中野市「中野市バイオマス産業都市構想」(2016),  
<[https://www.city.nakano.nagano.jp/docs/2016111100063/file\\_contents/2.pdf](https://www.city.nakano.nagano.jp/docs/2016111100063/file_contents/2.pdf)> (2019年5月参照)
- 5) R. C. PETERSEN: 'The Chemistry of Solid Wood',

American Chemical Society,(1984)

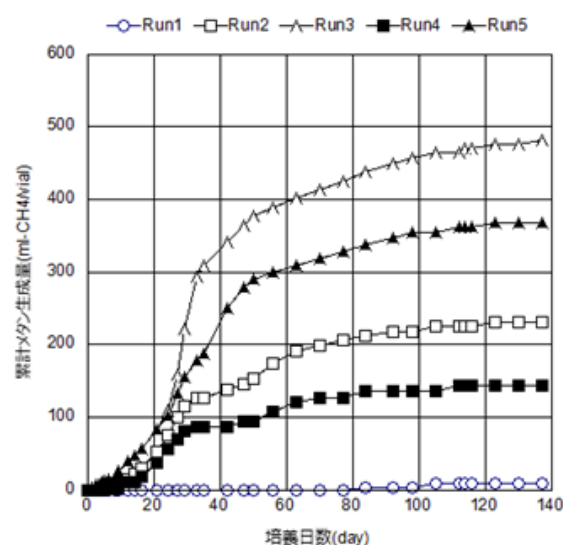


図1 キノコ廃菌床メタン発酵の累積メタン生成

表4 各種バイオマスの中温メタン発酵収率

発酵基質	メタン収率 [ml-CH <sub>4</sub> /g-VS]	出典
廃菌床	234	本研究 Run3
廃菌床(爆砕)	238	本研究 Run5
牛ふん尿	230	中久保ら <sup>7)</sup>
牛ふん尿	315	櫻井ら <sup>8)</sup>
製紙スラッジ (ルーメン処理)	230	S. Takizawa ら <sup>9)</sup>
トウモロコシ藁	285	M.Cieslik ら <sup>10)</sup>

- 6) 浅野憲哉: 地域由来の湿潤バイオマスからの生物学的メタン生成, 長野工業高等専門学校紀要第51号, p.1-4, (2017)
- 7) 中久保亮 他, 牛ふん尿のメタン発酵における食品廃棄物投入の効果, 廃棄物学会論文誌, Vol.19, No.6, pp.392-399 (2008)
- 8) 櫻井邦宣 他: 高濃度牛ふん尿の中温メタン発酵特性, 廃棄物学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.65-73 (2005)
- 9) S. Takizawa et. al.: Pretreatment with rumen fluid improves methane production in the anaerobic digestion of paper sludge, Waste Management, 78,p.379-384,(2018)
- 10) M.Cieslik et.al.: Methane fermentation of the maize straw silage under meso- and thermophilic conditions, Energy,115,p.1495-1502,(2016)