

地域由来の湿潤バイオマスからの生物学的メタン生成

浅野 憲 哉*

Methane fermentation of regionally accrued wet biomass.

ASANO Kenya

The methane fermentation of Japanese mushroom ligneous bed waste was conducted for estimate steam explosion as pretreatment. Methane yield was improved to 50-75% by pretreatment of mushroom bed with severity factor 2.1-3.2.

キーワード：廃棄物系バイオマス，メタン発酵，キノコ廃菌床，蒸煮爆砕処理

1. 研究背景

近年，近代化や経済成長による都市由来の廃棄物量の増加がみられるが，それに伴い減量化や最終処分場の確保が問題となっている。一方で，地球温暖化やエネルギー問題の観点からバイオマス資源の利用が注目されているが，これには廃棄物系，未利用系および資源作物系のバイオマスが含まれる。廃棄物のうち有機物を豊富に含むものは，廃棄物系バイオマスとしてカーボンニュートラルなエネルギー源の利用が期待されている¹⁾。木質系バイオマスはチップ，ペレット及び薪などの固形燃料として，廃油は液体燃料として徐々に利用されている。下水汚泥，生ごみ，食品加工残渣および家畜排せつ物などの湿潤バイオマスは，水分を多く含むため，メタン発酵による減量化を伴ったバイオガス化が普及しつつある。

廃棄物系バイオマス等のバイオマス資源は，広く浅く分布していることや副産物として発生することが多いため，原料の収集，運搬，利用などを通して地域に見合う方法で経済性を確保する必要がある¹⁾。長野市を中心とした長野県北部では，地域特有の農業として果樹園やキノコ栽培が挙げられるため，果汁加工の際の压榨残差やキノコ栽培に伴う廃菌床等がバイオマス資源として発生することが特徴的であ

る。キノコの廃培地にはおが屑やコーンコブミールが用いられるが，水分を 60~70%程度含んでおり，品種によってはキノコの収率と同程度かそれ以上の量が残渣として発生することもあり，長野市で年間約 4 万 3 千トンが，中野市で年間約 9 万 5 千トン程度が発生しているとされている^{2,3)}。これらの廃菌床のうち，コーンコブ系の一部は家畜飼料等として付加価値の高い再利用がされているが，大半は開放系で単純な堆肥化処理がされているため，温暖化係数が二酸化炭素の約 20 倍とされているメタンガスが大気へ放出されていることも懸念される。

湿潤バイオマスのメタン発酵の技術はし尿処理などで古くから知られているが，嫌気性細菌群の働きにより有機性廃水や有機性廃棄物をメタンと二酸化炭素を含むバイオガスへ分解することで，有機物を減量化しながらエネルギー資源を回収する方法である。バイオガス中に 60%程度メタンが含まれるため，大規模な処理施設ではバイオガスを発電に利用し，自家消費や売電を実施する例も増えている。また，コジェネレーションによる熱回収を行うことで，有機物が持つエネルギーの 80%程度を利用することも可能である^{4,5)}。

メタン発酵を物質代謝の面でみると，一般に 4 つの代謝フェーズで分けることができる(図 1)。1 つ目の加水分解段階では高分子有機化合物や固形有機物等(タンパク質，炭水化物，脂質)が可溶性の単体(アミノ酸，単糖類，脂肪酸等)へと分解されていく。2 つ目の酸生成段階ではそれらの単体がさらに

* 環境都市工学科 准教授

原稿受付 2017 年 5 月 31 日

低分子の酪酸、プロピオン酸、酢酸などの有機酸を中心とした中間代謝産物へと変化していく。3つ目の水素生成及び酢酸生成段階は、中間代謝産物から酢酸や水素といったメタン生成細菌の直接的な基質が生成される代謝を示しており、4つ目のメタン生成段階で酢酸または溶解性の水素と炭酸塩から、バイオガスとしてメタンガスと炭酸ガスが生成される。前半の1段階目と2段階目を併せて酸生成相と呼び、後半の3段階目と4段階目の代謝段階を併せてメタン生成相と呼ぶ^{4),5)}。

酸生成相は pH 5.0~6.5 で効果的に実施されるが、メタン生成相の最適 pH は 7.0~8.0 程度とされており 6.5 以下で発酵阻害が起こり始めるのが一般的である。このため、分解性の高い糖類やデンプンなどの炭水化物を含む原料をメタン発酵する際は、酸生成相の急激な進行によりメタン生成相が阻害されないように処理装置を2相に分けるなどの工夫がされることが多い。

一方で、セルロースやリグニンを多く含む原料では、有機物が水へ容易に溶解せず、酸生成相の代謝速度が遅いためメタン発酵全体の律速段階とみなされることが多い。難分解性の有機物をエタノール発酵等の生物処理するために、酵素処理、酸処理、蒸煮・爆砕処理などが研究されてきている。このうち蒸煮・爆砕処理は一般に 2~5 MPa と 200~260℃ 程度の高圧高温条件下で数分間の水蒸気処理を行い、セルロースやリグニンなどの難分解性物質を溶解性の糖質へと分解し、様々な酵素処理しやすくするための前処理として研究されてきた^{6),7),8)}。

本研究では、おが屑由来のキノコ廃菌床に対して蒸煮・爆砕処理を実施し、回分実験によるメタン発酵へ供した際のメタン生成への影響を調査した。

2. 研究方法

2-1 メタン発酵の種汚泥

本研究のメタン生成細菌群の種汚泥には、前半の Run1~4 と後半の Run5~8 で、異なる消化汚泥を用いた。前半の Run1~4 では、長野県内の食品加工排水処理施設の UASB グラニュール（中温処理）を常温で3か月以上静置したものを種汚泥とした。後半の Run5~8 では、新潟県内で中温嫌気性消化により厨芥たい肥化を実施している施設の消化汚泥を、常温で3か月以上静置したものを種汚泥として用いた。この汚泥は、COD(Cr) 19000mg/L で全窒素(T-N)が4700mg/Lの濃度であった。

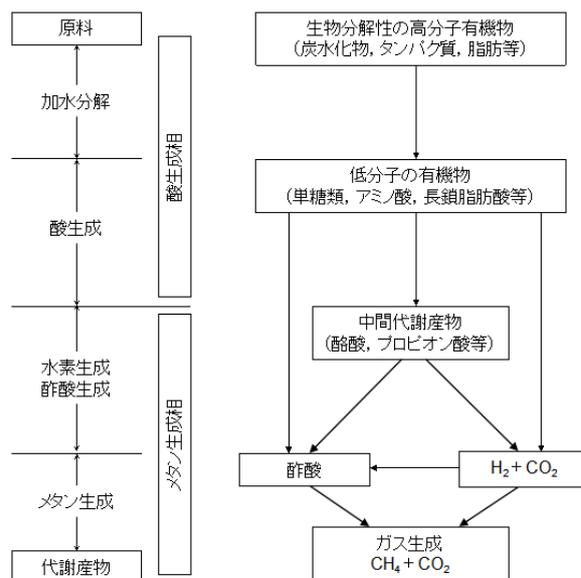


図1 バイオマスのメタン発酵代謝フロー^{4),5)}

試料には、長野県内のキノコ生産工場より入手したキノコ廃培地を冷凍保存したものをを用いた。キノコ廃培地は未処理状態で水分が 62~64%，総固形物量(TS)が 34~38%，TS に占める揮発性固形物(VS)が 86~92%であった。一般にキノコ培地には、おが屑等の木質系成分を由来とするものとコーンコブ（トウモロコシの芯）を由来とするものに分けられる。これらのうち、本研究では家畜の飼料などに利用しにくいとされる、おが屑由来の廃菌床を用いた。試料の前処理として実施した蒸煮・爆砕処理には日本電熱製の装置を使用した。処理条件は温度が 160~243℃、圧力が 0.5~3.5MPa、処理時間が 2~3min の範囲で設定した。200℃、1.5MPa、2min の爆砕処理に供した試料について TS ベースで COD(Cr) および T-N を測定したところ、COD(Cr) : TS 比が約 87% で、T-N : TS 比が約 1.5% であった。

2-2 メタン発酵回分実験の方法および測定項目

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 のバイアル瓶を用いて 35℃ の振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基質を供給し、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。Run1~4 は発酵日数 70 日目まで、Run5~8 は発酵日数 132 日目まで回分実験を継続した。Run 1,2,4,7 および 8 については、同じ条件で 2 本ずつ試験を実施した。このうち、Run 1 および 5 は、基質を添加せずに培養した。

表1 メタン発酵の条件

Run No.	消化汚泥由来	汚泥容積 (mL)	投与基質の 前処理条件	VS 負荷率 (g-VS/L)	液相合計 (mL)	発酵日数 (day)
1a,1b	中温 UASB	40mL	-(ガス生成補正用)	-	80mL	70
2a,2b	中温 UASB	40mL	未処理(対照区)	2.0	80mL	70
3	中温 UASB	40mL	221°C, 2.5M Pa, 3min	2.0	80mL	70
4a,4b	中温 UASB	40mL	243°C, 3.5M Pa, 3min	2.0	80mL	70
5	中温厨芥処理	40mL	-(ガス生成補正用)	-	80mL	132
6	中温厨芥処理	40mL	未処理(対照区)	4.1	80mL	132
7a,7b	中温厨芥処理	40mL	160°C, 0.5M Pa, 2min	3.5	80mL	132
8a,8b	中温厨芥処理	40mL	200°C, 1.5M Pa, 2min	3.2~3.3	80mL	132

バイオガスの生成量は、ガス生成状況に合わせて毎日または数日おきに、ガラスシリンジを用いてブチルゴム栓より針を挿入して測定した。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 Porapak Q を、キャリアガスにはアルゴンガスを用いた。

3. 結果

累積メタン生成量の経時変化について、Run 1~4 を図 2 へ、Run 5~8 を図 3 へ示す。種汚泥のみで培養した Run 1 および 5 にてメタンガスが生成しているが、これらは種汚泥に含まれる有機物の分解によるものであるため、これらの体積を差し引いた値を各試験区の正味メタン生成量とした。また、未処理試料で培養した Run 2 および 6 の正味メタン生成量を基準に、爆砕処理した試料の発酵性能を評価した。同条件で 2 本のバイアルを用意した試験区は、平均値を試験区のデータとして採用した。

Run 1~4 では爆砕処理により増えた分解性の高い基質のメタン生成速度差を主眼に実施したため、メタン生成曲線が S 字カーブとなる前に発酵を停止した。正味のメタン生成量は Run 2,3,4 でそれぞれ 16,28,40 mL となり、爆砕温度が高いほどメタン生成速度が向上したことが確認された。Run 5~8 では爆砕処理の温度や圧力条件を弱めて、基質本来のメタン収率を得る目的も兼ねて S 字カーブとなるまで発酵を継続したところ、正味のメタン生成量は Run 6,7,8 でそれぞれ 95,123,134mL となり、爆砕温度が高いとメタン収率が向上する傾向が確認された。

基質 VS 投与量当たりのメタン収率と相対値及び

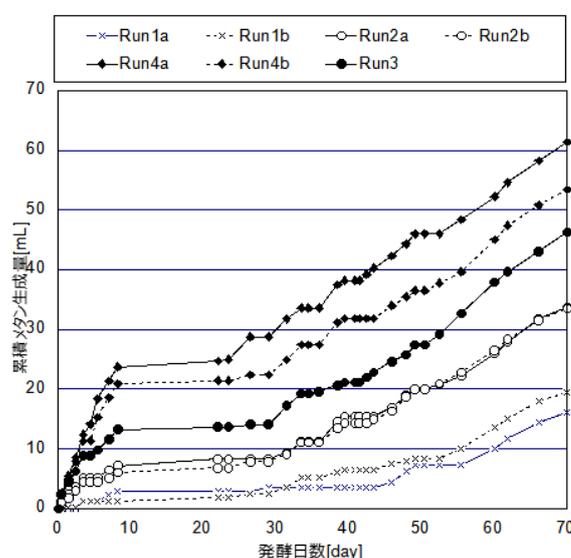


図2 爆砕廃菌床メタン発酵による累積 CH₄ 生成(Run 1-4)

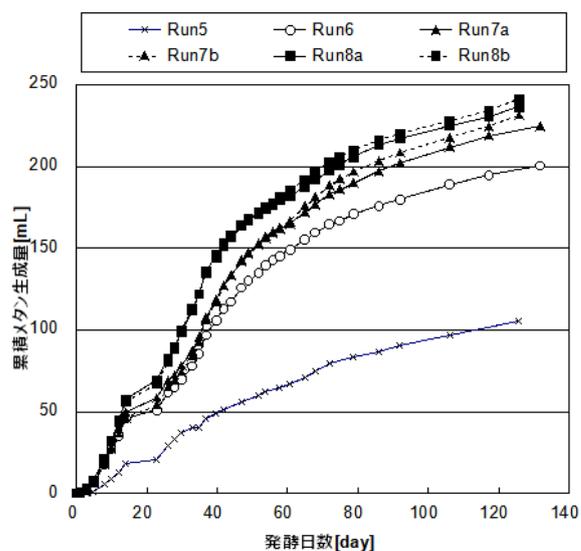


図3 爆砕廃菌床メタン発酵による累積 CH₄ 生成(Run 5-8)

SF 値を表 2 に示した。メタン収率は未処理試料(Run 6)で 292 mL/g-VS となり、固形物濃度が高いとされる牛ふん尿を対象にメタン発酵を実施した、櫻井らの収率 (315 mL/g-VS) や、中久保らの収率 (230 mL/g-VS) と近い値となっていた。これに対して、爆砕試料(Run 7,8)では収率が 438 および 513 mL/g-VS となり、Wang らが分解性の高いとされる厨芥や果菜類廃棄物を対象としたメタン発酵収率 (693-725 mL/g-VS) と比較的近い値が得られた^{9),10),11)}。これは、Iroba らの麦藁の爆砕実験でセルロース類が分解された結果からも、爆砕処理により廃菌床の溶解性成分が増加したためだと推察される⁸⁾。

SF 値(severity factor)とは、蒸煮爆砕処理の強度を表す指標として、処理温度と処理時間から求められる値であり、式(1)で示される。

$$SF = \log_{10} \left[t \cdot \exp \left(\frac{T_r - 100}{14.75} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、t: 処理時間, T_r : 処理温度である。

厳密には試料の含水量なども考慮する必要があるが、一般的には SF 値が高いと固形物の可溶化が進む傾向にある⁸⁾。Run 2 を基準に各試験区のメタン収率を比較すると、Run 3 と 4 で SF 値が各々 4.0 と 4.7 のとき、投与 VS 当たり収率が 180% と 252% へと上昇していた。同様に Run 6 を基準に比較すると、Run 7 と 8 で SF 値が 2.1 と 3.2 のとき、投与 VS 当たり収率は 150% と 175% へと各々上昇していた。これより、SF 値に伴い VS 当たりメタン収率が上昇する傾向が確認された。

4. まとめ

複数の温度条件で蒸煮爆砕処理した長野県由来のキノコ廃菌床のメタン発酵回分実験により、以下の知見が得られた。

- (1) 未処理廃菌床のメタン収率が 292 mL-CH₄/g-VS に対して、SF 値 2.1~3.2 程度の爆砕処理を行った廃菌床のメタン収率が 438~513 mL-CH₄/g-VS となり、メタン収率の向上が確認された。
- (2) 廃菌床に対する蒸煮爆砕処理の SF 値が高いほど、メタン収率及びメタン生成速度が向上する傾向が観察された。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、キノコ廃菌床の蒸煮爆砕試料は直富商事(株)及び日本電熱(株)より提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

表 2 メタン収率と SF 値

Run No.	CH ₄ 収率 [mL-CH ₄ /g-VS]	SF 値	CH ₄ 収率相対値 [%]
2	98	-	100
3	177	4.0	180
4	247	4.7	252
6	292	-	100
7	438	2.1	150
8	513	3.2	175

参考文献

- 1) 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>> (2017 年 5 月参照)
- 2) 長野市「バイオマスタウン構想」(2010), <<https://www.city.nagano.nagano.jp/uploaded/attachme nt/1903.pdf>> (2017 年 5 月参照)
- 3) 中野市「中野市バイオマスタウン構想」(2010), <http://www.city.nakano.nagano.jp/docs/2014011601888/file_contents/biomass town.pdf> (2017 年 5 月参照)
- 4) 野池達也 他:「メタン発酵」, 技法堂出版 (2009)
- 5) 李玉友, メタン発酵技術の概要とその応用展望, 日本環境衛生施設工業会 (JEFMA), 53, pp.4-18 (2005)
- 6) 是石真友子 他, 酵素糖化と発酵を併用した小麦フスマからの効率的エタノール生産, 生物工学会誌, 87 巻, 5 号, pp.216-223 (2009)
- 7) B.Toussaint et.al, Effect of steam explosion treatment on the physico-chemical characteristics and enzymic hydrolysis of poplar cell wall components, Animal Feed Science and Technology, 32, pp.235-242,(1991)
- 8) K.L. Iroba et.al., Pretreatment and fractionation of barley straw using steam explosion at low severity factor, Biomass and Bioenergy, 66, pp.286-300, (2014)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) L.Wang et.al, Anaerobic co-digestion of kitchen waste and fruit/vegetable waste: Lab-scale and pilot-scale studies, Waste Management, 34, pp.2627-2633, (2014)