

〔短報〕

肉牛ふん尿の中温乾式メタン発酵特性

湊 啓子

肉牛ふん尿オガクズ混合物（肉牛ふん尿）の中温（37℃）乾式メタン発酵特性を解明するために、1Lの発酵槽を用いて70日間回分培養を行い、種汚泥（乳牛ふん尿メタン発酵消化液）の添加割合、水分率およびアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）濃度がメタン発酵に及ぼす影響を調べた。肉牛ふん尿に種汚泥を1～4割添加した結果、添加割合の増加に伴う発酵促進効果は認められず1割の添加で十分であると推測された。メタンガス発生量は投入原料の水分率の低下および $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の増加に伴い各々減少傾向を示し、投入原料の水分率が68%未満、発酵残渣の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度が4,000mg/kg以上でメタンガス発生の抑制程度は大きくなった。水分54～69%の肉牛ふん尿からは60～92ml/g-VSのメタンガスが発生した。有機物分解率は15～21%、発酵残渣の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は1,500～2,500mg/kgであった。

緒 言

北海道内には50.5万頭の肉用牛が飼養されており、年間467万tのふん尿が発生している⁷⁾。肉牛ふん尿は、現状ではそのほとんどが堆肥化处理（好気発酵）されているが、メタン発酵処理（嫌気発酵）によりエネルギーを回収することができれば、資源循環型社会形成の一助となることが期待される。

メタン発酵法には固形分濃度4～12%で運転する湿式法と固形分濃度20～40%で運転する乾式法がある⁴⁾。湿式法は、家畜ふん尿処理技術として1980年代から実用化されている技術であり、道内では2012年に再生可能エネルギー固定価格買取制度が導入されて以降、乳牛ふん尿の処理施設として急速に普及しつつある。湿式法では、発酵処理後に含水率95%程度の窒素やカリウムを多量に含む発酵残渣（消化液）が発生する。消化液には速効性の肥料成分が多く含まれるため、飼料作や畑作物の基肥として利用できるが⁵⁾¹⁰⁾、液肥を還元する農地を確保できない場合には高度な排水処理施設が必要となり、多大なエネルギーとコストを要する。一方、乾式法は、発酵残渣は固形物として堆肥化处理できるため、排水処理が不要で、液肥の利用が困難な地域でも導入可能な技術として注目されている。しかしながら、国内では食品加工残渣などを処理するプラントが2施設あるのみで、家畜糞

尿を原料とする実用プラントはみられない²⁾。

肉用牛はオガクズ等の敷料上で飼養されるため、ふん尿には多量の敷料が混入し乾物率が高い。このため、メタン発酵処理方式としては乾式法が適していると考えられる。しかし、これまでに、肉牛ふん尿を乾式メタン発酵に供試した先行研究は見られず、乾式メタン発酵原料としての適用性は不明である。

そこで、本試験では、肉牛ふん尿の中温（37℃）乾式メタン発酵特性の解明を目的として、メタン発酵立ち上げ時に必要な種汚泥の添加割合、投入原料の水分率およびアンモニア態窒素濃度がメタン発酵に及ぼす影響を検討するとともに、肉牛ふん尿からのメタンガス発生量や有機物分解率等を明らかにしたので、以下に報告する。

試験方法

1. 実験装置

容量1Lの丸底セパラブルフラスコにテドラーバックを装着したものを発酵槽とし、原料を充填後に密封して37℃の恒温槽内で70日間培養した。テドラーバックは、試験開始後3週間は1～3日間隔、3週以降は5～7日間隔で交換してガス分析に供した。

2. 供試材料および試験処理

北海道立総合研究機構畜産試験場内の黒毛和種肥育牛を繋養する牛舎から搬出された肉牛ふん尿オガクズ混合物（以下肉牛ふん尿と略記）を原料とした。供試肉牛ふん尿の理化学性状を表1に示した。種汚泥としては、乳牛ふん尿を発酵原料とするバイオガスプラント（中温、

湿式)の発酵槽から採取した消化液(水分95.5%)を用いた。これらの材料を用いて以下の3つの試験を実施した。

(1) 種汚泥の添加割合がメタン発酵に及ぼす影響(試験1)

肉牛ふん尿に対して、種汚泥を種汚泥/原料比(S/F)、0.0, 0.1, 0.2および0.4の割合で添加した処理区を設け、それぞれ対照区, S/F 0.1, S/F 0.2およびS/F 0.4区として、各450gを発酵槽に充填した。

(2) 水分率がメタン発酵に及ぼす影響(試験2)

肉牛ふん尿400gに種汚泥を40g添加したものに対して、蒸留水を各々0, 60, 140および260ml添加した処理区を設け、それぞれ水分58%, 63%, 68%および74%区として発酵槽に充填した。

(3) アンモニア濃度がメタン発酵に及ぼす影響(試験3)

肉牛ふん尿480gに対して、尿素を各々0.0, 0.4, 0.8および1.2g添加した処理区を設け、それぞれ対照区, Urea1, Urea2およびUrea3区として、尿素をアンモニアに分解させるために室温で一晩静置した後、それぞれ48gの種汚泥を混合して発酵槽に充填した。

なお、種汚泥から発生するガス量を把握するために、1Lフラスコに種汚泥を800g充填して同様に培養し、メタンガス発生量を調査した。

表1 供試肉牛ふん尿の理化学性状

	試験1	試験2	試験3
pH	9.4	9.1	9.3
水分 (%)	69.2	54.2	61.3
VS (%、w.b. ¹)	29.1	42.9	35.5
TK-N (mg/kg、w.b.)	4500	5391	5662
NH ₄ ⁺ -N (mg/kg、w.b.)	854	956	1099
C/N	32.2	36.8	31.1

¹w.b.: wet base

3. 測定項目および方法

発酵槽への投入原料および試験終了時の発酵残渣について、pH、水分率、揮発性固形物濃度(Volatile solid: VS)、全窒素濃度(TK-N)およびアンモニア態窒素(NH₄⁺-N)濃度を測定した。pHはガラス電極法、水分率は105℃・24時間乾燥法、VSは強熱減量法(550℃・4時間)で測定した。本報ではVSを有機物と考え、その減少率を有機物分解率とした。TK-Nは硫酸分解法、NH₄⁺-NはFIA-ガス拡散法(FIAstar5000, FOSS)により測定した。バイオガス発生量は大型シリンジを用いて計量して標準状態に換算した。メタンガス濃度はガスクロマトグラフ(島津製作所, GC-8A)を用いて測定した。なお、各処理区のメタンガス発生量は、種汚泥から発生するメタンガス量を減じて、肉牛ふん尿から発生するガス量とした。

結 果

バイオガス発生量、メタンガス濃度および累積メタンガス発生量の推移を図1に、投入原料の性状変化、有機物分解率および投入VSあたりの累積メタンガス発生量を表2に示した。

1. 種汚泥の添加割合がメタン発酵に及ぼす影響(試験1)

バイオガス発生量は、対照区では明瞭な発生ピークは認められなかったが、種汚泥添加区(S/F0.1, S/F0.2およびS/F0.4)では、培養開始8~10日後に発生ピークを迎え、その後しだいに減少した(図1-a))。メタンガス濃度は、バイオガス発電機の稼働に必要な下限値である55%を超えるまでに、対照区では23日間を要したのに対し、種汚泥添加区では約7日で55%を越え、その後は55~60%の間で推移した(図1-b))。バイオガス発生量およびメタンガス濃度の推移に種汚泥の添加割合の影響は見られなかった。投入VSあたりの累積メタンガス発生量は、対照区, S/F0.1, S/F0.2およびS/F0.4区の順に、57.5, 91.8, 89.6および89.2ml/g-VSとなり、S/F0.1区が最も多かった(図1-c)、表2)。この結果を受けて、以降の試験では、肉牛ふん尿に対して種汚泥を1割添加した条件のもとで水分率およびアンモニア濃度の影響を検討した。

2. 水分率がメタン発酵に及ぼす影響(試験2)

バイオガス発生量は、水分率が高い処理区ほど発生ピークを迎えるのが早く、かつ、発生量が多い傾向が認められた(図1-d))。メタンガス濃度の推移に処理間で大きな差は見られず、試験1と同様の傾向を示した(図1-e))。投入VSあたりの累積メタンガス発生量は74%, 68%, 63%および58%区の順に、64.1, 60.1, 50.9および28.1ml/g-VSとなり、投入原料の水分率が低い処理区ほど少なかった(図1-f)、表2)。

3. アンモニア濃度がメタン発酵に及ぼす影響(試験3)

バイオガス発生量は、各処理区ともに培養開始7日後と17日後に発生ピークが認められた(図1-g))。2回目の発生ピークは、尿素添加量が多く投入原料中のNH₄⁺-N濃度が高い処理区ほどピーク値が低かった。メタンガス濃度はバイオガス発生量が少ない処理区においてやや高い傾向が認められた(図1-h))。投入VSあたりの累積メタンガス発生量は、対照, Urea1, Urea2およびUrea3区の順に、85.2, 83.4, 72.9および64.3ml/g-VSとなり、尿素添加量が多い処理区ほど少なかった(図1-i)、表2)。発酵残渣中のNH₄⁺-N濃度は同順に、2,490, 3,603, 4,180および4,015mg/kgであった(表2)。

4. 理化学性状の変化と有機物分解率

投入原料のpHは9.0～9.4の範囲にあり、発酵処理の前後で大きな変化は見られなかった。また、発酵処理過程で、水分率は2～4ポイント増加、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は1.3～2.9

倍に増加した。有機物分解率は、メタンガス発生が顕著に抑制された処理区（試験1：対照区，試験2：水分58%区）を除くと15～21%であった。

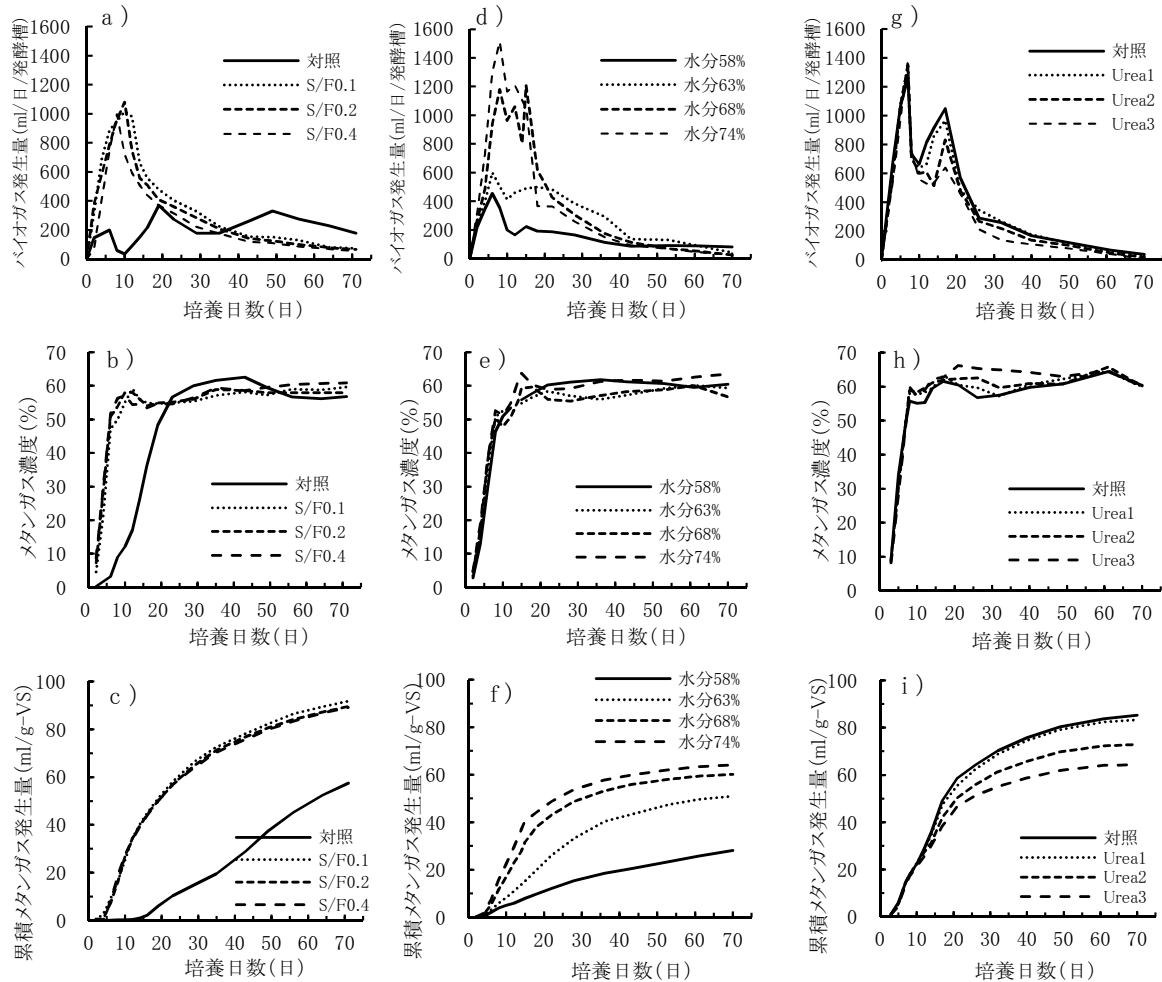


図1 バイオガス発生量，メタンガス濃度および累積メタンガス発生量の推移

a)～c)：試験1（種汚泥の添加割合），d)～f)：試験2（水分率の影響），g)～i)：試験3（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の影響）

表2 投入原料の性状変化，有機物分解率および累積メタンガス発生量

		試験1：種汚泥の添加割合				試験2：水分率の影響				試験3： $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の影響			
		対照	S/F0.1	S/F0.2	S/F0.4	58%	63%	68%	74%	対照	Urea1	Urea2	Urea3
pH	投入原料	9.4	9.3	9.4	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	9.1	9.1	9.1	9.1
	発酵残渣	9.0	9.0	9.0	8.9	9.3	9.2	9.2	9.0	9.3	9.3	9.3	9.4
水分 (%)	投入原料	69.2	71.5	73.3	76.5	58.3	63.0	68.3	73.8	70.3	70.6	70.4	70.5
	発酵残渣	71.8	75.6	77.1	79.8	60.2	66.1	71.6	76.7	73.9	74.3	73.8	73.1
TK-N (mg/kg, w.b. ¹)	投入原料	4,500	4,535	4,455	4,327	5,165	4,539	3,905	3,196	4,535	4,181	5,035	5,626
	発酵残渣	4,920	4,787	4,813	4,538	5,223	4,441	3,823	3,168	4,885	5,182	5,495	6,012
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg, w.b.)	投入原料	854	1,042	1,079	1,176	1,093	945	813	611	846	1,317	1,755	2,191
	発酵残渣	1,168	1,499	1,474	1,539	1,862	1,409	1,330	1,196	2,490	3,603	4,180	4,015
有機物分解率	(%)	13.4	21.3	21.4	20.3	9.1	14.5	17.4	15.2	19.6	19.2	18.1	15.5
累積メタンガス 発生量	(ml/g, w.b.)	16.7	26.7	26.1	25.9	12.0	19.0	19.1	16.7	25.2	24.6	21.5	19.0
	(ml/g-VS)	57.5	91.8	89.6	89.2	28.1	50.9	60.1	64.1	85.2	83.4	72.9	64.3

¹w.b. : wet base

考 察

1. 種汚泥の添加割合がメタン発酵に及ぼす影響

メタン発酵プロセスを速やかに立ち上げるには、適切な種汚泥を出来るだけ多く投入することが大切であり、汚泥の添加割合が多いほど、短期間でガス発生ピークを迎えることが報告されている⁶⁾。Jewell et al³⁾は、トウモロコシ稈を原料とした中温乾式メタン発酵において、種汚泥の添加割合をS/F 0.1~0.3の範囲で検討した結果を報告している。それによると、種汚泥の添加割合の低下に伴い、揮発性脂肪酸 (VFA) の蓄積によるpH低下と有機物分解率の低下が見られるため、種汚泥の添加割合としてはS/F 0.3を推奨している。本試験では、VFA濃度は未測定であるが、種汚泥の添加割合の減少に伴うpHや有機物分解率の低下傾向は認められず、投入VS当たりのメタンガス発生量はS/F0.1が最も多かったことから、種汚泥の添加割合は1割 (S/F 0.1) で十分であると推測された。Jewell et alの報告³⁾との違いは、供試原料の有機物分解率の差に起因すると考えられる。すなわち、Jewell et alの報告³⁾におけるトウモロコシ稈の有機物分解率 (35~74%) に対し、本試験での肉牛ふん尿の有機物分解率は20~21%と低かった。このため、種汚泥に対する易分解性の有機物割合がトウモロコシ稈よりも低く、添加割合がS/F0.1と低い場合でもVFAの蓄積による発酵阻害が生じなかったものと推測される。このように、種汚泥の適切な添加割合は原料の質によって異なるため、多様な原料を用いた検証が必要である。

2. 水分率がメタン発酵に及ぼす影響

乾式メタン発酵では、水分率が低下すると微生物活性の低下によりメタンガス発生量が減少することが報告されている³⁾。本試験においても、投入原料の水分率の低下に伴いメタンガス発生量が減少する傾向が見られた (図1-f, 表2)。74%区のメタンガス発生量を100とすると、68%, 63%および58%区はそれぞれ94, 79および44となり、水分68%未満の処理区においてメタンガス発生の抑制程度は大きくなった。この結果は、乾物率30%以上になるとメタン発生量が顕著に減少することを示したJewell et alの報告³⁾とほぼ一致するものであった。以上より、乾式メタン発酵を良好に進めるためには、投入原料の水分率を概ね70%以上に調整することが望ましいと推察されるが、多様な原料を用いた詳細な検証が必要である。

3. アンモニア濃度がメタン発酵に及ぼす影響

中温の湿式メタン発酵では、 NH_4^+ -N濃度が3,000~4,000mg/Lになるとメタン発酵が阻害されるとされてい

る¹¹⁾。本試験では、肉牛ふん尿に尿素を添加してアンモニア阻害の影響を検討した結果、尿素添加量が多く投入原料中の NH_4^+ -N濃度が高い処理区ほどメタンガス発生量が少ない傾向が認められた (表2)。Urea1区の発酵残渣の NH_4^+ -N濃度は3,603mg/kgであり、上述¹¹⁾のアンモニア阻害が生じる濃度範囲にあったが、メタンガス発生量は対照区の98%であり、アンモニア阻害の影響は小さかった (表2)。一方、発酵残渣の NH_4^+ -N濃度が4,000mg/kg以上であったUrea2とUrea3区のメタンガス発生量はそれぞれ対照区の86%, 76%となり、アンモニア阻害の影響が大きく現れたものと推測された。試験1~3 (Urea1~3を除く) の発酵残渣中の NH_4^+ -N濃度は概ね1,200~2,500mg/kgの範囲にあったことから、肉牛ふん尿単独で乾式メタン発酵を行う場合においては、アンモニア阻害の影響が生じる可能性は低いと推察された。

4. メタンガス発生量と有機物分解率

種汚泥無添加、投入原料の水分率が68%未満、および発酵残渣の NH_4^+ -N濃度が4,000mg/kg以上となった処理区を除くと、供試肉牛ふん尿からは60~92ml/g-VSのメタンガスが発生した。その際の有機物分解率は15~21%であった (表2)。本試験で肉牛ふん尿から発生したメタンガス量は、乳牛ふん尿の中温湿式メタン発酵で報告されているメタンガス発生量 (150~266ml/g-VS)^{4), 8), 9)}の1/2以下の低い値であった。この原因は、メタン発酵過程での有機物分解率が乳牛ふん尿の既往の報告値 (43~49%)⁴⁾に比して、本試験では15~21%と低かったことに起因すると推測される。本試験における有機物分解率の低さは、供試肉牛ふん尿中に難分解性有機物であるオガクズが多量に含まれていたことが主要因と考えられる。また、試験2のメタンガス発生量が試験1および3よりも少なかったのは、供試ふん尿中のオガクズ混入割合が他の試験よりも多かったためと推測される。このことは、試験2の供試ふん尿 (表1) が他の試験に比べ水分率が低く炭素率 (C/N比) が高いことから説明できる。なお、本試験の有機物分解率は、乳牛ふんオガクズ混合物の堆肥化 (好気発酵) 過程で報告されている有機物分解率 (11~18%)¹⁾, 20%)⁵⁾とほぼ同等であることから、メタン発酵自体は良好に進行したものと推測される。

5. まとめ

肉牛ふん尿の乾式メタン発酵特性として以下のことが明らかとなった。

(1) 肉牛ふん尿に種汚泥 (乳牛ふん尿メタン発酵消化液) を1割添加することによりメタン発酵は速やかに立ち上がった。

(2) 投入原料の水分率が68%未満、発酵残渣の NH_4^+ -N

濃度が4,000mg/kg以上でメタンガス発生抑制程度は大きくなった。

(3) 肉牛ふん尿（水分54～69%）からは60～92ml/g-VSのメタンガスが発生した。有機物分解率は15～21%、発酵残渣の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は1,500～2,500mg/kgであった。

本試験結果より、肉牛ふん尿に種汚泥（乳牛ふん尿メタン発酵消化液）を1割添加して、投入原料の水分率を概ね70%以上に調整することにより、乾式メタン発酵が良好に進行することが分かった。しかし、オガクズを多量に含む肉牛ふん尿は、メタン発酵過程での有機物分解率が低く、メタンガス発生量が少ないため、メタンガスを得る目的の原料としては不適であると考えられた。但し、有機物分解率の低さは、有機物負荷率を高められることを示唆するものであるため、今後、食品加工残渣などのメタンガス発生ポテンシャルの高い有機性廃棄物との乾式メタン発酵処理を検討したい。

引用文献

- 1) 阿部佳之, 福重直輝, 伊藤信雄, 加茂幹男. 吸引通気式堆肥化処理技術の開発（第2報）. 農業施設. 34-1, 21-30 (2003)
- 2) 北海道立畜産試験場. 平成21年普及奨励ならびに指導参考事項. 北海道農政部, 札幌, 2009, p.493-495
- 3) Jewell, W. J., Cummings, R. J., Dell'Orto, S., Fantoni, K. J., Fast, S. J., Gottung, E. J., Jackson, D. A., Kabrick, R. M. Dry fermentation of agricultural residues. New York, Solar Energy Research Institute, 1982, p.12-13
- 4) 家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理技術研究会. 家畜排泄物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き. 財団法人畜産環境整備機構, 東京, 2001, p.9
- 5) 湊啓子, 渡部敢, 田村忠. 石炭灰（クリンカアッシュ）の牛ふん堆肥化副資材としての利用性. 北海道立畜産試験場研究報告. 26, 24-30 (2007)
- 6) 野池達也. メタン発酵. 技報堂出版, 東京, 2009, p.129-131
- 7) 農林水産省統計部『畜産統計』
<http://www.maff.go.jp/hokkaido/toukei/kikaku/database/tikusan.html> (平成27年2月1日参照).
- 8) 櫻井邦宣, 李玉友, 野池達也. 高濃度牛ふん尿の中温メタン発酵特性. 廃棄物学会誌. 16, 65-73 (2005)
- 9) 瀧澤 直弥, 梅津 一孝, 高畑 英彦, 干場 秀雄. 乳牛糞尿による貯留型嫌気発酵槽の温度特性. 帯広畜産大学学術研究報告. 自然科学 19(1), 31-36 (1994)
- 10) 徳田進一, 田中康男, 東尾久雄, 村上健二, 相澤証子, 浦上敦子, 國久美由紀. キャベツの露地栽培にお

けるメタン発酵消化液の効果的な施用方法. 日本土壌肥科学雑誌. 81(2), 105-111 (2010)

- 11) 有機資源 熱・エネルギー化調査検討専門委員会. バイオガス化マニュアル. 社団法人日本有機資源協会, 東京, 2006, p.49

The Study on Dry Methane Fermentation of Beef Cattle Manure

Keiko MINATO

Hokkaido Research Organization Animal Research Center,
Shintoku, Hokkaido, 081-0038 Japan