

## 動物排泄物処理における高温高压水処理システムの導入可能性の検討

環境安全システム学分野 116671 高山義裕

指導教員 布浦鉄兵 准教授

*Keywords: Animal waste, Supercritical water, Subcritical water, Zoological garden*

### 1. 緒言

産業廃棄物の22%<sup>[1]</sup>を占める動物排泄物は、時間経過により病原菌を発生するおそれがある。そのため、迅速な無害化処理を施す必要があり、現在は焼却処理や堆肥化処理が適用されている。しかしながら、焼却処理は投入エネルギー量が多く、多量のCO<sub>2</sub>を排出する、堆肥化処理は処理時間が長く、悪臭を発生するといった問題点を抱えている。このため、現在はこれらの処理方法に替わる生体・環境にやさしい動物排泄物の処理方法が模索されている。高温高压水を用いる方法は解決策の一つであり、鶏糞<sup>[2]</sup>や豚糞<sup>[3]</sup>などを対象に様々な研究成果が報告されているが、鶏、豚、牛といった家畜以外の動物排泄物を対象とした高温高压水処理の研究は行われていない。

しかしながら、日本国内の動物園の数は日本動物園水族館協会に加盟している動物園だけでも86園<sup>[4]</sup>あり、これに非加盟の動物園を加えると数百にも及ぶ。さらに、動物園には象のような一日あたりの排泄量が1頭につき120kgに達する動物種も存在する。このため、家畜以外の動物排泄物を対象とした高温高压水処理の研究も環境負荷低減の観点から早急になされるべきであると考えられる。

本研究では、これまで研究が行われてこなかった家畜以外の動物排泄物を対象とした高温高压水処理実験を実施した。反応後の気体生成物を燃料ガスとして、液体生成物を液体肥料として利用することを目的とし、分解特性の解明を試みた。また、動物園への導入シミュレーションを行い、設備の導入コストやエネルギー収支を明確化することにより、動物園に対して従来の方法に替わる新しい動物排泄物の処理方法を提案する。

### 2. 実験方法

実験装置の概略を図1に示す。実験には、内径14.8mm、内容積29.3mLのSUS316製の回分式反応器を使用した。反応器に原料である動物の糞と純水を封入し、200~400°Cに予熱した塩浴に浸漬することによって反応を開始させた。30~90分間反応させた後、塩浴から反応器を取り出し、水浴に投入することで反応を停止させた。生成物は反応停止後、速やかに回収し、気体・液体・固体に分離した後、定性・定量分析を行った。原料には、ミキサーを用いて粒径425μm以下にしたライオン(学名: *Panthera leo*)、アジアゾウ(*Elephas maximus*)、アフリカゾウ(*Loxodonta africana*)、グレビーシマウマ(*Equus grevyi*)、モウコノウマ(*Equus ferus przewalskii*)、インドサイ(*Rhinoceros unicornis*)の糞を使用した。これらの動物糞は全て東京都の多摩動物公園より提供を受けた。

原料の元素分析にはCHNコーダー(ヤナコ分析工業、MT-6)を、粘度の測定には粘度計(エー・アンド・デイ、SV-10)をそれぞれ使用した。また、気体生成物の定性・定量にはGC-TCD(島津製作所、GC-2014)を使用した。液体生成物は、NとPの定量には全窒素全りん計(東亜ディーケーケー、TNP-10)を、Kの定量にはイオンクロマトグラフ(日本ダイオネクス、DX-120)を、有害成分の定量にはICP-MS(島津製作所、ICPM-8500)をそれぞれ使用した。

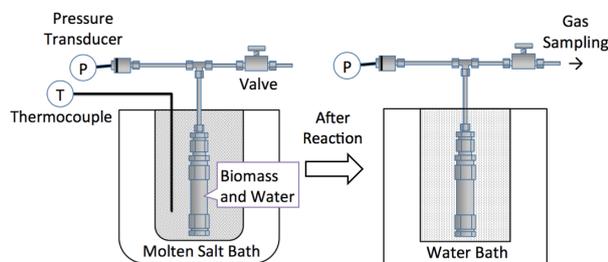
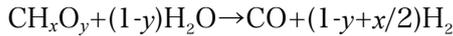


図1 実験装置の概略図

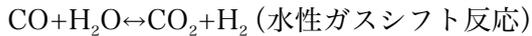
### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 反応温度の影響

反応時間 60 分、反応圧力 2.1~25MPa、原料濃度 5wt% の条件でライオンの糞を処理したときの生成ガス量の変化を図 2 に示す。200°C と 300°C の実験では、生成ガスの 90% 以上が CO<sub>2</sub> であるが、400°C の実験では各ガスの収率が飛躍的に増加した。これは温度の上昇とともに以下に示す 3 つの化学反応が促進したことによると考えられる。



(水蒸気改質反応)



#### 3.2 反応時間の影響

反応温度 400°C、反応圧力 25MPa、原料濃度 5wt% で実験を行った際の生成ガス量を図 3 に示す。図 3(a) のライオンの糞を用いた実験では、時間の増加とともに各ガス量も増加するが、図 3(b) のグレビーシマウマの糞では大きな差が見られなかった。このことから、ライオンの糞は反応速度が遅く、反応時間 90 分でも分解途中であると結論付けることができる。また、グレビーシマウマの糞のガス化では、総ガス量に大差はないものの、時間の増加とともに CO が減少し CH<sub>4</sub> が増加していることからメタン化反応が緩やかに進行していることが示唆された。

#### 3.3 原料濃度の影響

反応温度 400°C、反応圧力 25MPa、反応時間 60 分で実験を行ったときのガス収率を図 4 に示す。H<sub>2</sub> の生成量は減少し、CO、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> の生成量は増加していることから、水蒸気改質反応とメタン化反応が同時に進行したと結論付けることができる。また、H<sub>2</sub> が減少したことに着目すると、水蒸気改質反応で生成する H<sub>2</sub> よりもメタン化反応で消費される H<sub>2</sub> の方が多いと推察される。

#### 3.4 動物の種類による違い

反応温度 400°C、反応圧力 25MPa、反応時間 60 分で実験を行った際の各ガスの生成量を図 5 に示す。肉食動物であるライオンの糞に比べ、草食動物 5 種の糞は気体生

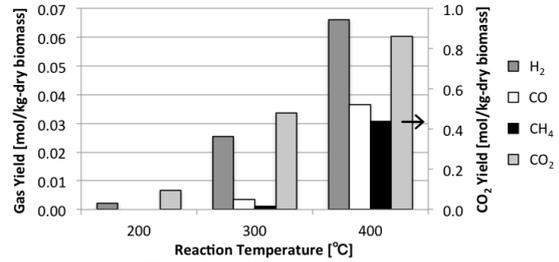


図 2 反応温度の影響 (60 分、5wt%、CO<sub>2</sub> は右軸参照)

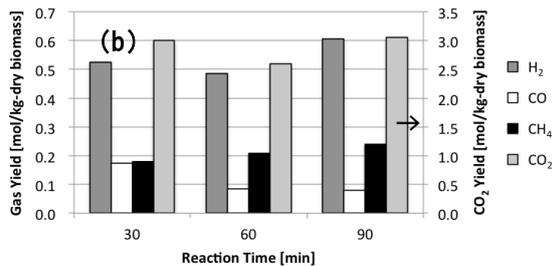
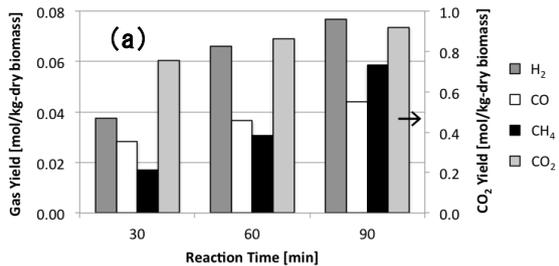


図 3 反応時間の影響 (a) ライオンの糞 (b) グレビーシマウマの糞 (400°C、25MPa、5wt%、CO<sub>2</sub> は右軸参照)

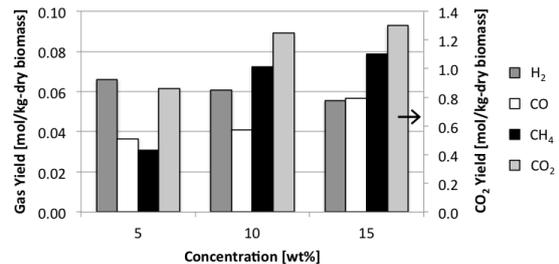


図 4 原料濃度の影響 (400°C、25MPa、60 分、CO<sub>2</sub> は右軸参照)

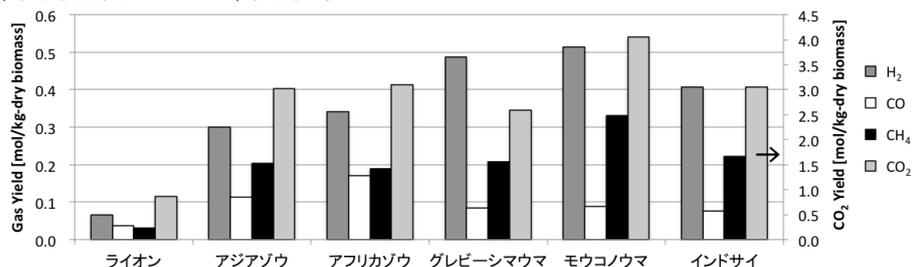


図 5 動物の種類による違い (400°C、25MPa、60 分、CO<sub>2</sub> は右軸参照)

成量がはるかに多いことが確認された。これは、草食動物の主食である草に含まれるセルロースがガス化し易い<sup>[5]</sup>ため、草食動物の糞が効率的にガス化したことに由来する。

### 3.5 液肥利用の可能性の検討

高温高压水処理後に得られた液体生成物が液肥として利用可能であるかを検討するために液体生成物中に含まれる肥料成分と有害成分を定量した。

肥料成分は肥料の三要素である N、P、K を定量し、市販液肥の希釈後濃度と比較した。ライオンとアジアゾウの糞を高温高压水処理して得られた液体生成物を分析した結果を表 1 に示す。また、有害成分は Cr、Pb、Ni、As、Cd、Fe、Cu、Zn、Se、Mo を測定し、農林水産省が定める汚泥肥料中の許容量<sup>[6]</sup>と比較した。Cr、Ni、Cd の測定結果を図 6 に示す。

2つの測定結果より、動物の糞を高温高压水処理して得られた液体生成物には、肥料の三要素が十分に含まれており、施肥による土壌環境への悪影響がないことが確認された。

## 4. 導入シミュレーション

本研究では、4種類の排泄物処理システムを対象に、3つの視点から分析を行うことで、各システムが持つ優位点を究明した。4つの排泄物処理システムには、従来型排泄物処理システムとして焼却処理と堆肥化処理を、次世代型排泄物処理システムとして亜臨界水処理と超臨界水処理を採用した。分析には、コスト分析、エネルギー収

支分析、地球温暖化への影響評価の3つを使用した。また、予備実験として、園内で発生するバイオマスとほぼ同等の成分を持つ混合バイオマスを作製し、実験を行った。

図 7 に超臨界水処理のシステムフローを載せる。園内で発生する動物糞と寝糞の混合物を回分式処理装置に投入し、ヒーターで加熱することにより超臨界水処理を行う。ガス化後の生成物のうち、気体は燃料電池により電力に変換して園内の照明等に使用し、液体は N と P の成分を調整した後液体肥料として園内の売店で販売して収益を上げることにした。

### 4.1 コスト分析

各処理システムの支出と収入の差を計算することによりコスト分析を行った。亜臨界水処理と超臨界水処理における検討項目を表 2 に示す。建設コストは償却期間 7 年、残存価値 10%で減価償却を行い、毎年の支出として計上した。また、生成液肥の販売価格が年間収支に大きな影響を及ぼすことが判明したため、亜臨界水処理システムと超臨界水処理システムでは液肥販売価格を 3 つ設定し、それぞれについて年間収支を算出した。分析結果を表 3 に示す。亜臨界水処理システムは液肥販売価格 500 円/L から黒字化する一方、超臨界水処理システムでは設備費や光熱費が高くなるため液肥販売価格を上げて黒字化は困難であることが分かった。しかし、シナリオ 4-2 に示すように、Ni 触媒を使用してガス化率を向上させることにより液肥販売価格 1000 円/L でも黒字化することが可能となった。

表 1 肥料成分比較

	反応温度 [°C]	濃度 [mg/L]		
		N	P	K
ライオンの糞	200	2230	137	348
	400	1715	37	226
アジアゾウの糞	200	530	150	446
	400	595	36	426
希釈後の市販液肥		0.4	0.2	0.4

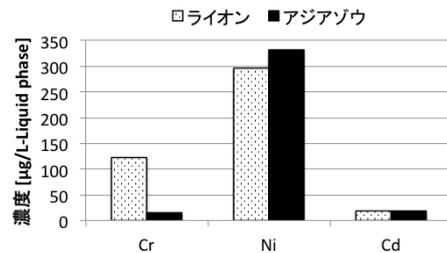


図 6 重金属濃度 (実験条件は 400°C、25MPa、60 分、5wt%。Cr、Ni、Cd の許容量はそれぞれ 500ppm、300ppm、5ppm)

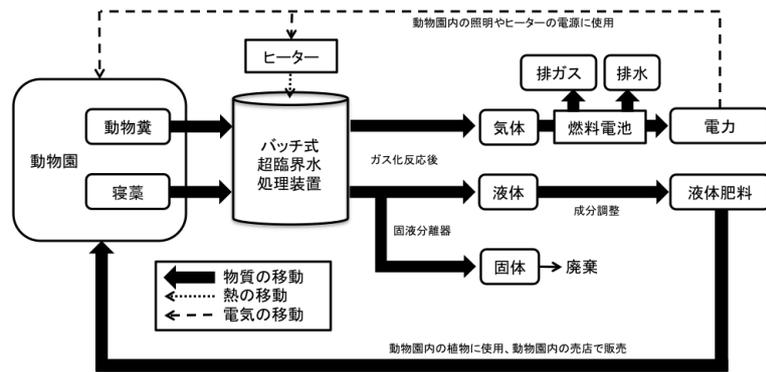


図 7 超臨界水処理のシステムフロー

表2 コスト分析における検討項目 表3 コスト分析結果 (シナリオ4-2は乾燥バイオマスの400%にあたるNiを添加)

項目	シナリオ1 焼却処理	シナリオ2 堆肥化処理	シナリオ3 亜臨界水処理			シナリオ4-1 超臨界水処理(無触媒)			シナリオ4-2 (Ni触媒)	単位
			液肥 400円	液肥 600円	液肥 800円	液肥 1000円	液肥 2000円	液肥 3000円	液肥 1000円	
支出の部	減価償却費			▲ 640		▲ 4349		▲ 6459	万円/年	
	修繕費			▲ 249		▲ 1691		▲ 1691	万円/年	
	光熱費			▲ 477		▲ 2622		▲ 2622	万円/年	
	人件費			▲ 1643		▲ 1643		▲ 1643	万円/年	
	運搬費	▲ 1500	▲ 1500						万円/年	
	処理委託費	▲ 814	▲ 400						万円/年	
	液肥購入費			10		10		10	万円/年	
	削減光熱費					380		11360	万円/年	
	液肥販売益			2182	4301	6421	1740	3900	6060	万円/年
	液肥売却益								1740	万円/年
削減電気料金								697	万円/年	
収支	▲ 2314	▲ 1900	▲ 817	1303	3422	▲ 8174	▲ 6014	▲ 3855		

## 4.2 エネルギー収支分析

消費エネルギーと生成エネルギーの差を求めることによりエネルギー収支分析を行った。検討した項目を表4に、分析結果を表5に示す。超臨界水処理システムでは触媒としてNiを使用することにより生成ガス量が増え、燃料電池の発電量と熱回収量が大幅に増加するためエネルギー収支がプラスに転じることが分かった。

表4 エネルギー収支分析における検討項目

	シナリオ1 焼却処理	シナリオ2 堆肥化処理	シナリオ3 亜臨界水処理	シナリオ4 超臨界水処理
消費エネルギー	バイオマスの運搬 焼却処理 焼却灰の運搬	バイオマスの運搬 堆肥化処理		ヒーターの動力 ヒーターからの熱ロス 反応器からの熱ロス 攪拌器の動力 クレーンの動力
生成エネルギー				燃料電池の発電量 燃料電池からの熱回収量

表5 エネルギー収支分析結果

項目	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3	シナリオ4-1	シナリオ4-2	単位
	焼却処理	堆肥化処理	亜臨界水処理	超臨界水処理 (無触媒)	超臨界水処理 (Ni触媒)	
消費エネルギー	▲ 2186	▲ 768	▲ 1342	▲ 7981	▲ 7981	GJ/年
生成エネルギー				1287	26009	GJ/年
エネルギー収支	▲ 2186	▲ 768	▲ 1342	▲ 6694	18028	GJ/年

## 4.3 地球温暖化への影響評価

CO<sub>2</sub>を基準として他の温室効果ガスがどれだけ温暖化する能力があるのかを数値化した地球温暖化係数を用いることにより地球温暖化への影響を評価した。本研究では、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の発生量を求め、それぞれの年間発生量M<sub>gas</sub>と地球温暖化係数GWPを乗じた値の総和Σ(M<sub>gas</sub>×GWP)により分析した。分析結果を表6に示す。焼却処理が地球温暖化に及ぼす影響が突出しており、堆肥化処理、亜臨界水処理、無触媒の超臨界水処理が地球温暖化に及ぼす影響は比較的少ないことが確認された。

表6 地球温暖化への影響評価結果

項目	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3	シナリオ4-1	シナリオ4-2	
	焼却処理	堆肥化処理	亜臨界水処理	超臨界水処理 (無触媒)	超臨界水処理 (Ni触媒)	
地球温暖化係数	CO <sub>2</sub>	1				
	CH <sub>4</sub>	23				
温室効果ガス発生量 [kg/年]	CO <sub>2</sub>	3264931	40121	17370	84171	671081
	CH <sub>4</sub>	36	123	22	0	0
Σ(M <sub>gas</sub> ×GWP)	3265762	42955	17878	84171	671081	

## 5. 結言

本研究では、パラメータを変化させて高温高圧水処理実験を行い、各パラメータが及ぼす分解特性を解明した。その結果、反応時間や原料濃度に比べて反応温度の影響が大きいことが分かった。また、反応時間と原料濃度の影響は小さいものの、水蒸気改質反応やメタン化反応が緩やかに進行していることが示唆された。液体生成物の分析では、動物糞を高温高圧水処理して得られた液体生成物は液肥として十分に使用可能であることが確認された。導入シミュレーションでは、コスト分析、エネルギー収支分析、地球温暖化への影響評価を実施した。分析結果より、超臨界水処理システムは地球温暖化への影響が小さく、収益を上げることが可能な排泄物処理システムであることが確認された。超臨界水処理システムはコスト面とエネルギー面で課題が残ったが、Niを触媒として添加することによってガス化効率が大幅に改善され、収益を上げられるようになることが分かった。

【参考文献】 [1] 環境省, “産業廃棄物排出・処理状況調査報告書” (2009). [2] Nakamura *et al.*, *J. Chem. Eng. Japan* **41** (2008) 433-440. [3] Yong *et al.*, *Ind. Eng. Chem. Res.* **51** (2012) 5685-5690. [4] 日本動物園水族館協会 (2011). [5] Guo *et al.*, *Catal. Today* **129** (2007) 275-286. [6] 農林水産省, “肥料取締法の概要” (2010).