

# 豚糞および木炭の燃焼特性と熱分解特性の基礎実験

菊地正憲<sup>1)</sup>・平野公孝<sup>1)</sup>・守田幸司<sup>2)</sup>・諸岩広大<sup>2)</sup>・森田明宏<sup>3)</sup>

## Basic Experiments of Combustion Characteristics and Thermal Analysis for Biomass Fuels, Pig Excrements and Wood Charcoal

KIKUCHI Masanori, HIRANO Kimitaka, MORITA Kouji,  
MOROIWA Koudai, MORITA Akihiro

### Abstract

Biomass fuels in this study are pig excrements, wood charcoal, sawdust and these mixtures. The bench scale combustion furnace is a rotary kiln furnace with electric heating. A method of fuel feeding is the batch method. The temperature on the inner wall of the furnace is set on 550°C. When the fuel is burning, time-series data of important quantities, such as the temperature on the furnace wall, the temperature of combustion gas and components of combustion gas, O<sub>2</sub>, CO, NO and other, are measured. It is experimentally shown the effects of the composition of biomass fuels on burning behavior and the difference of rates of combustion between wood charcoal and pig excrements. Furthermore, the thermal analysis such as DTA and TG of these fuels is conducted. The DTA curves have two peaks, and the second peak at higher temperature means the combustion of solid carbon. The second peak of pig excrements is shifted to higher temperature than the second peak of wood charcoal.

### Key Words :

Biomass, Pig Excrements, Wood Charcoal, Combustion, Thermal Analysis

### 1. はじめに

地球温暖化への国際的な対応策として、2005年2月の京都議定書の発効、更に、2006年3月の「バイオマス・ニッポン総合戦略」の閣議決定等、持続的発展可能な社会の実現に向け、多様な取組みが開始されている。このようにバイオマス資源の積極的な利用の重要性が高まる中で、宮崎県都城盆地エリアにおける未利用バイオマスとして、畜産排泄物と林地残材を対象とする熱エネルギー利用の計画<sup>1)</sup>が着

目されている。

都城地域の畜産業は、全国トップクラスの水準で高度に集積している。しかし、2004年に家畜排泄物の野積み等が禁止され、これらの適切な処理が緊急の重要課題となっている。このような状況の中で、宮崎県の計画においても、2010年までの目標として、豚糞50万トン/年、鶏糞20万トン/年の浄化・焼却を行うこととされている。ブロイラーの鶏糞については、宮崎県内2カ所の鶏糞発電所等における燃料として、年間20万トンが既に活用されている<sup>2)</sup>。一方、高水分の豚糞の処理は未確立の状況にある。特に、都城盆地エリアの土壌・地下水の硝酸性窒素の濃度は大変高い現状にあり、これ以上の高濃度化を防ぐためにも、処理システムの開発が必要となっ

1) 機械システム工学科教授

2) 機械システム工学専攻大学院生

3) 宮崎県産業支援財団研究員

ている。

また、この地域は、スギ生産日本一など豊富な森林資源も有し、これを活用した木材関連産業も集積した地域である。しかし、スギ材等の生産量にほぼ匹敵する大量の捨て切り間伐材や末木・枝条が林地残材や土場残材として未利用の状況におかれている。このため、中山間地域の活性化を目指し、これらの木質バイオマスの積極的な有効活用等の対応が求められている。

以上のことから、高水分であり自然の難しい家畜排泄物である豚糞を、間伐材等から作られる低品質木炭を助燃材として安定的に燃焼させ、バイオマスの熱エネルギーをカスケード的に利用するシステムの開発を目指すプロジェクトが進められている<sup>1)</sup>。このプロジェクトでは、特に、豚糞および低品位木炭を効率的に燃焼させ、バイオマスエネルギーを熱エネルギーに転換させる熱回収システムを開発することを目指している。この熱エネルギーを木材および野菜残さ等を乾燥させるための熱源として積極的に活用するカスケード熱利用の促進も、重要なテーマとなっている。

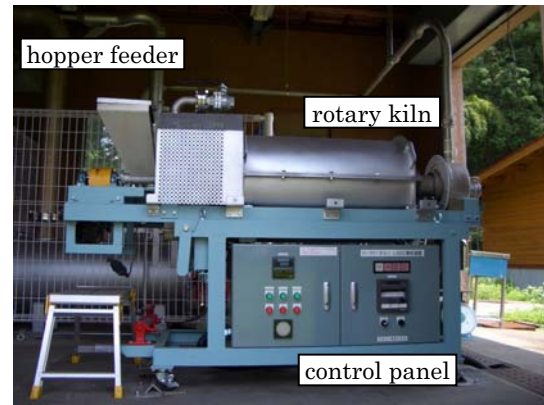
水分の低い鶏糞や木質バイオマスの燃焼に関しては、多くの基礎的実験やシステム開発等が実施されている<sup>3)4)5)</sup>。しかし、高水分の豚糞と木炭の混合物に関する研究は、ほとんど報告されていない。従って、本研究では、豚糞及び低品位木炭の未利用バイオマスの熱エネルギーへの転換に関する基礎的資料を得ることを目的として、次のことを明らかにする。

- (1) 豚糞および低品位木炭等の木質バイオマスに関する燃焼特性の把握
- (2) バイオマスの熱分解特性の解析及び熱収量・燃焼エネルギーの検討

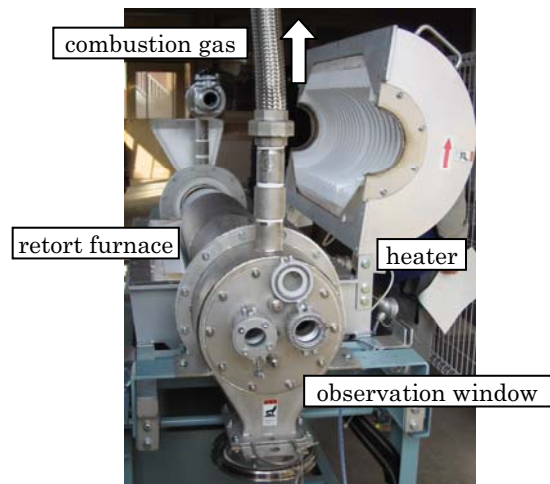
## 2. バイオマス燃焼実験の装置及び方法

### 2.1 バイオマス燃焼試験機

Fig.1に、実験で用いたベンチスケール燃焼炉としてのロータリーキルン型外熱式電気加熱燃焼炉（中央化工機株式会社、JCE-125-1型）を示す。Fig.1(a)は、この全体外観の写真であり、Fig.1(b)は、炉の内部構造を示す。この実験炉は、宮崎県畜産試験場（宮崎県高原町）内に設置されている。こ



(a) Overall view



(b) Retort furnace and heater

Fig.1 Rotary-kiln furnace

の燃焼炉の外枠寸法は、長さ1,155mm、幅650mm、高さ1,274mmである。燃料の投入方法にはバッチ式と連続式の2種類の方式があり、これに対応した円筒形状のレトルト炉（以下、レトルト）が燃焼炉内に置かれる。本実験での燃焼はバッチ式で行われ、このバッチ式レトルトの大きさは、内径200mm、長さ380mmであり、レトルトの回転数は約4rpmである。バッチ式の場合の処理能力は、2 l /batchである。この燃焼炉では、レトルトを囲む4.2kW×2組の電気ヒーターにより炉壁温度が最高1,000°Cまで加熱可能である。本研究では、炉壁の設定温度は550°Cに固定された。

また、燃焼排ガス分析は、燃焼炉レトルトの出口に開けられた小穴よりプローブを挿入して計測される。燃焼炉入口には、空気取入れ用のダクトが付けられており、管オリフィス等により空気量を計測できる。しかし、連続的な燃料供給用ホッパーやレトルトの回転部の隙間等から漏れこむ空気量も多

くあり、最終的に燃焼に使われた空気量は計測できていない。

更に、燃焼炉の下流には、燃焼時の燃焼排ガスによる悪臭及びダイオキシン対策用の二次燃焼装置が設けられている。

## 2.2 バイオマス燃料

豚糞は、糞尿分離された比較的取り扱いの容易な母豚の豚糞を対象にしている。この豚糞は、宮崎県畜産試験場（宮崎県高原町）の協力を得て、隣接の宮崎県原種豚センターから実験日の朝に採取された新鮮な糞として供給された。母豚糞の水分は、およそ70%である。

木炭は、スギ間伐材を、備長炭の炭化温度よりもはるかに低い温度である400°Cで炭化した低品位木炭である。この木炭の粒径は、1~7mmの範囲で篩われた粒炭であり、その水分は約8%である。これらは、日高勝三郎商店（宮崎県延岡市）で製造された。

また、実験では、木炭（粒炭）よりも粒径の細かいおが粉も、比較対象のために使用された。おが粉の水分は、約14%である。

今回実験で用いられた各燃料の高発熱量を以下に示す。豚糞の高発熱量は8サンプルの平均値19.7MJ/dry-kg、標準偏差0.595MJ/dry-kgであり、木炭では3サンプルの平均値32.2MJ/dry-kg、標準偏差0.358MJ/dry-kgである。またおが粉では1サンプルであるが、約14MJ/dry-kgである。

燃焼実験の燃料は、豚糞、木炭、おが粉およびこれらの混合物であり、これらの500wet-gをレトルト内に置き、バッチ的に燃焼させた。Table 1には、実験番号1~9について、バイオマス燃料の重量構成

比とその構成比に対する水分の計算値を示す。ここで、豚糞をPE(pig excrements)、木炭をWC(wood charcoal)、おが粉をSD(saw dust)と表している。実験1は豚糞のみ、実験2は木炭のみ、実験3はおが粉のみ、実験4,5,6は豚糞と木炭の混合体、実験7,8,9は豚糞とおが粉の混合体を燃料としている。混合体は、wet重量ベースで豚糞を基本として3種類の割合（それぞれ2:1, 1:1, 1:2）で混合されたものである。

## 2.3 計測機器

計測項目は、燃焼炉レトルトの入口温度と出口温度、更に燃焼排ガスの温度とその成分である。

燃焼炉内温度は、熱電対（ウインテクス株式会社、Kタイプ、常用限界温度900°C）により測定された。また、燃焼ガスの成分は、燃焼排ガス分析計（ホダカ株式会社、HN-1600N）により計測され、酸素濃度(O<sub>2</sub>)[vol%]、一酸化炭素濃度(CO)[ppm]、一酸化窒素濃度(NO)[ppm]、排ガス温度[°C]の4つの項目が測定された。

バイオマス燃料の水分は、乾燥減量法による赤外線水分計（ケツト科学研究所、FD-610）により測定された。即ち、この方法は、試料を105°C、1時間乾燥させ、その前後の重量差から水分を計測する方法である。この簡易型の方法による水分の測定精度の確認のため、工作用紙粘土（クツワ株式会社）の水分計測を、105°C、24時間乾燥による常圧加熱重量減少測定法による送風定温恒温器（ISUZU、EFS-115S）による水分測定の結果と比較した。それぞれ3回の測定結果の平均値は、本手法の水分が77.5%、24時間乾燥による水分が79.3%となり、本手法でも必要な精度は得られていると考えられる。

Table 1 Moisture contents

Exp. No.	Weight percent [%]			Percentage of moisture content[%]
	PE	WC	SD	
1	100	-	-	70
2	-	100	-	8
3	-	-	100	14
4	67	33	-	49
5	50	50	-	39
6	33	67	-	29
7	67	-	33	51
8	50	-	50	42
9	33	-	67	32

## 3. 熱分解特性の実験方法

### 3.1 試料の作成

木炭の試料作成方法は、はじめに、4mmのフルイを通過したスギチップ約40gを16時間105°Cで乾燥させた。次に、この乾燥チップを秤量した後、ウッドセラミックス研究用製炭装置(株式会社弘前機械開発)を用いて、150°C、200°C、250°C、280°C、300°C、330°Cの炭化温度で、それぞれ3時間加熱し炭化させた。得られた炭化物はボールミルを用いて

Table 2 Combustion time and temperature

Exp. No.	Preheating time [min]	Combustion time [min]	Wall temperature [°C]		Max. temperature of combustion gas [°C]
			Entrance	Exit	
1	63	20.5	515	485	208.6
2	33.5	129	400	370	261.1
3	26	52.2	370	340	118.1
4	62.5	61	440	420	194.3
5	43.5	53	555	550	245.9
6	31.5	110.5	465	430	215.8
7	41	53	420	395	125.4
8	36	42.5	480	450	150.6
9	56	64	370	350	133.2

Table 3 Combustion gas

Exp. No.	Min. concentration of O <sub>2</sub> [vol%]	Max. concentration of CO [ppm]
1	19.8	1,245
2	17.9	5,108
3	14.4	11,104
4	19.4	2,502
5	19.9	2,673
6	18.8	2,987
7	19.4	3,014
8	18.9	2,946
9	18.7	4,406

粉碎され、250 $\mu$ mのフルイを通過したものを、更に105°Cで絶乾にした。

豚糞の試料は、ガラス容器内の減圧条件の下で加温され、30時間乾燥したものを乳鉢で粉碎された。

### 3.2 熱分解特性の計測方法

試料の熱量は、それぞれの試料約0.5gを雁皮紙に包み、ボンベ熱量計（島津製作所、CA-4PJ）を用いて、常法に従って測定された。

更に、示差熱(DTA)の熱分解特性は、試料を白金容器に入れ、空気雰囲気下で熱分析計（島津製作所、DTG-60A）を用いて測定された。ただし、昇温速度は10°C/minと設定された。

## 4. 燃焼実験の結果及び考察

Table 2には、燃焼実験1~9の結果をまとめてある。即ち、燃焼までの予熱時間、燃焼時間、炉壁温度及び燃焼ガスの最高温度が示されている。ここで、燃焼開始は、燃料の着火によりO<sub>2</sub>濃度が標準大気の20.9vol%から減少する時刻とし、燃焼終了は、再び20.9vol%のO<sub>2</sub>濃度に戻った時刻と設定する。従って、燃料の燃焼時間は、燃焼終了時刻と燃焼開始時刻との差として定義される。Table 3には、O<sub>2</sub>の最小濃度及びCOの最大濃度がまとめられている。

### 4.1 燃焼ガスデータの時間的変化

燃焼実験の時系列データの例として、Fig.2に豚糞と木炭のwetベースの重量比が1:2の混合燃料（実験6）に対する炉壁温度、燃焼ガスの温度及び燃焼ガスの各成分濃度の時間的変化を示す。横軸は実験開始後の経過時間（分）を、縦軸は温度（右軸）と濃度（左軸）を示す。ただし、濃度については、O<sub>2</sub>濃度は標準大気での濃度20.9%を基準とし、CO濃度及びNO濃度はそれぞれ4,000ppmおよび100ppmを基準として無次元化されている。炉壁入口温度は、燃焼炉のヒーターにより上昇し、約45分程度で設定温度550°Cに達し、その後一定となる。炉壁出口温度も入口温度と同様な経過をたどるが、燃焼による熱放出のために入口温度よりも高温となる。燃焼ガスの温度は、炉壁温度に比べるとかなり低温となり、Table 2に示すように最高温度は216°Cとなっている。

Table1に示した各実験に対応して、Fig.2と同様な結果が得られる。例えば、木炭のみの燃料の場合（実験2）では、炉壁の加熱開始から31.5分の予熱



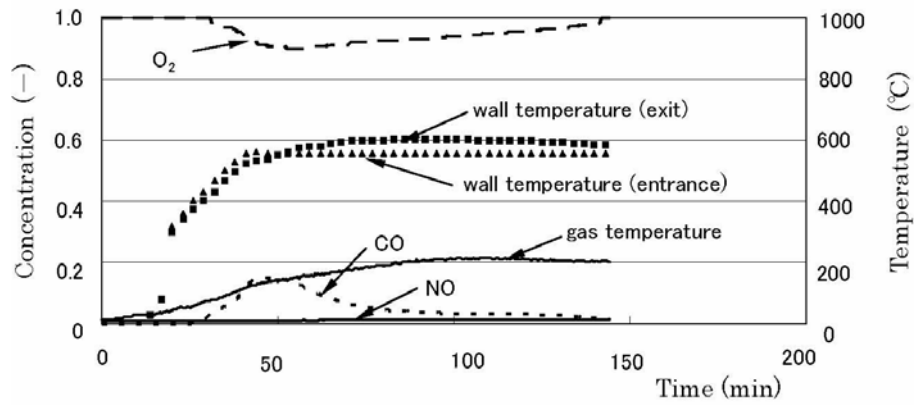


Fig.2 Time-series data of temperatures in the furnace and concentration of O<sub>2</sub>, CO and NO of combustion gas

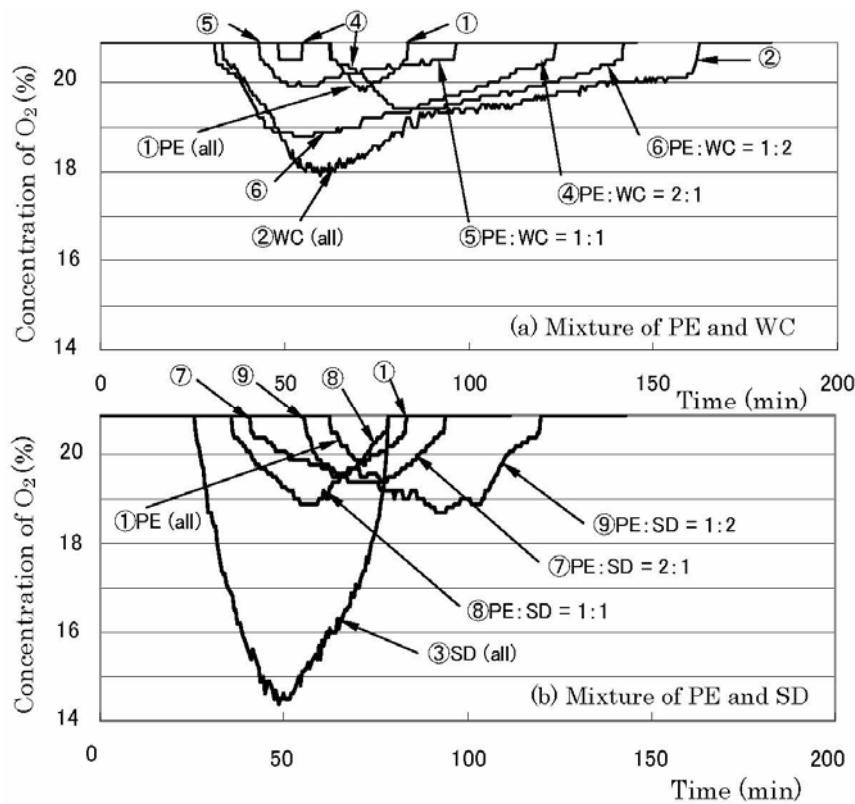


Fig.3 Effects of the fuel components on the concentration of O<sub>2</sub>; PE : pig excrements, WC : wood charcoal, SD : saw dust

期間を経て、炉壁入口温度が458°Cの段階で着火し燃焼が始まる。また、木炭がゆっくりと時間をかけて全て燃え切り、O<sub>2</sub>濃度が標準大気での濃度20.9%に戻るまでに110分を要する等、大変長い燃焼時間となっている。燃焼が開始されると、CO濃度は増加し、その後ゆるやかに減少する。NO濃度は、低い値である。

実験1～9の実験結果の各成分濃度についてまと

めた結果を、以下に示す。

Fig3には、混合体燃料の燃焼特性を表すO<sub>2</sub>濃度(vol%)の時間的変化をまとめたものである。Fig.3(a)には豚糞と木炭の混合体(実験4,5,6), Fig.3(b)には豚糞とおが粉の混合体(実験7,8,9)の結果である。O<sub>2</sub>濃度の変化からバイオマス燃料の燃焼特性を分析すると、豚糞のみの燃焼は、高水分であるため可燃成分は少なく、燃焼自体は顕著でない。

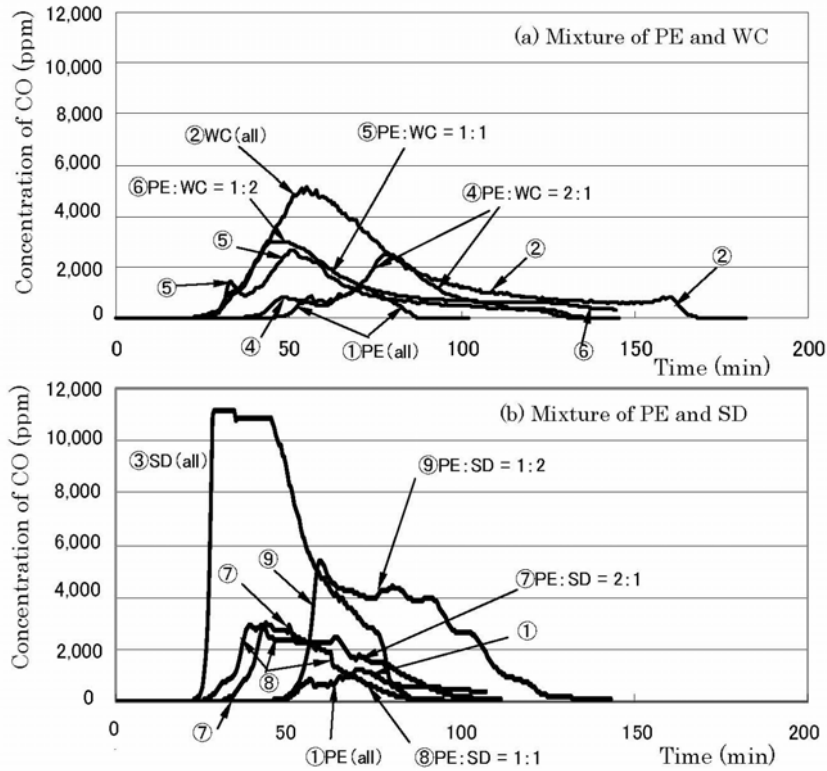


Fig.4 Effects of the fuel components on the concentration of CO;  
 PE : pig excrements, WC : wood charcoal, SD : saw dust

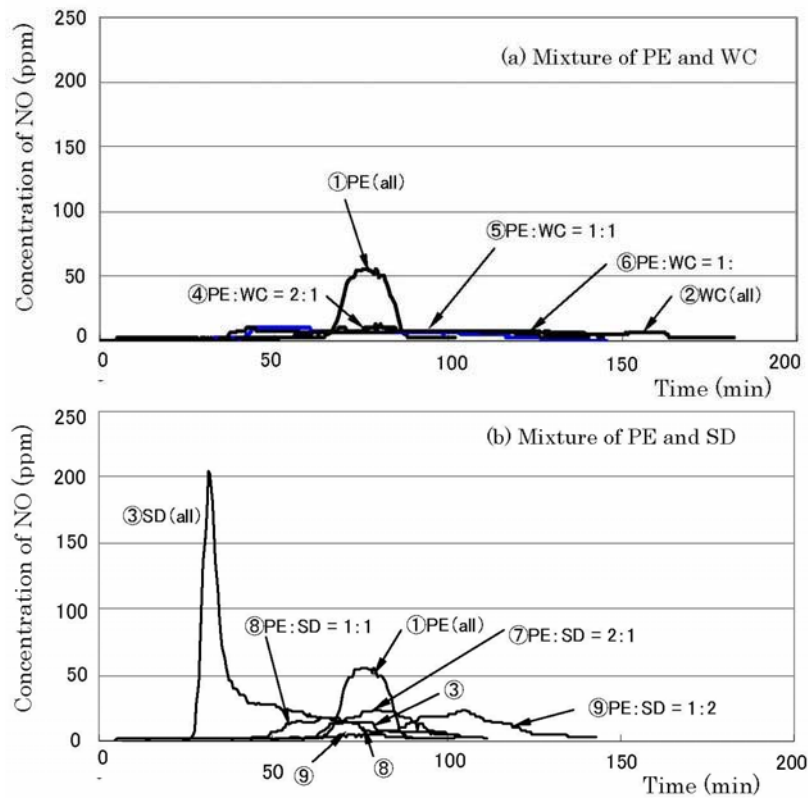


Fig.5 Effects of the fuel components on the concentration of NO;  
 PE : pig excrements, WC : wood charcoal, SD : saw dust

しかし、水分が蒸発するために時間が必要となるため、燃焼開始時刻は遅くなる。一方、おが粉のみの燃焼は、急激なO<sub>2</sub>濃度の減少、即ち急激な燃焼を示す。燃料の水分が完全に蒸発した絶乾状態になった後に燃焼が始まると

仮定して、燃料の乾燥状態の質量を前述の燃焼時間で割った値を、燃焼速度と定義する。すると、豚糞の場合には7.3 g-dry/min、木炭の場合には3.6 g-dry/min、おが粉の場合には8.2g-dry/minとなり、木炭（粒炭）の燃焼速度は豚糞の燃焼速度の約半分と遅くなっている。また、おが粉の燃焼速度は速く、直ぐに燃え尽きることを示している。混合燃料の燃焼特性は、基本的には、豚糞、木炭、おが粉の単体の燃焼状況の合成された特性を示している。

また、Fig.4(a)(b)には、Fig.3(a)(b)に対応したCO濃度(ppm)の時間的変化を示す。O<sub>2</sub>濃度が減少し燃焼が起きると、CO濃度は増加している。このように、O<sub>2</sub>とCOの濃度変化は、互いに逆の関係となっている。

更に、Fig.5(a)(b)には、Fig.3及びFig.4に対応した、NO濃度(ppm)の時間的変化を示す。Fig.5(a)より、豚糞と木炭の混合の場合には、豚糞のみを除くとNO濃度の変化はきわめてわずかなり、燃料構成比の違いはない。一方、Fig.5(b)には、豚糞とおが粉との混合の場合には、CO濃度の変化と同様ではあるが、これ程顕著な変化を示していない。従って、同じ木質系バイオマスであるおが粉よりも高発熱量の木炭を豚糞に加えた方が、燃焼ガス温度が上昇し(Table 2)、COの排出量も少なく、熱損失も小さくなる。

#### 4.2 豚糞の燃焼状態

バイオマス、とりわけ豚糞の燃焼特性は、日によって豚糞の水分が異なるため、大きく変動することが予想される。この燃焼特性の変動状況を明らかにするために、Fig.6に同じ500g-wetの豚糞を燃焼させたときの燃焼排ガス成分の時間的変化を示す。(a)はO<sub>2</sub>濃度、(b)はCO濃度、(c)はNO濃度の変化である。各図の横軸(時間軸)は、O<sub>2</sub>が減少を始める時刻を燃焼開始時刻として揃えられている。また、縦軸の濃度の表示は、Fig.2と同様に、O<sub>2</sub>、CO、NOについてそれぞれ20.9%、4,000ppm、100ppmで無次元化されている。

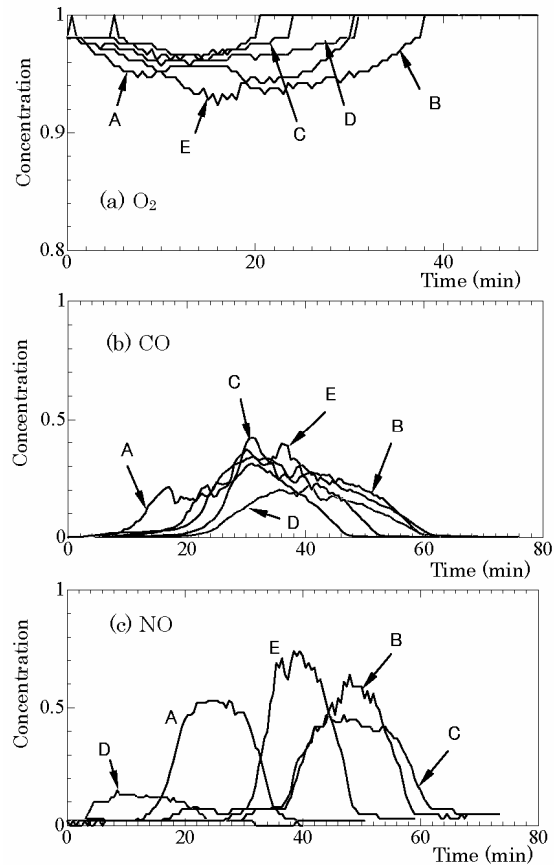


Fig.6 Concentration of components of combustion gas for pig excrements : (a) O<sub>2</sub>, (b) CO, (c) NO

燃焼実験は、2005年の冬季と夏季を含めた5回にわたり実施された。この実験の試料サンプルは同じ豚舎の母豚の豚糞である。これらの試料の水分と実験実施月(豚糞の採取された月)は以下であり、それぞれ記号A~Eで表示される。即ち、A:67%(1月)、B:73%(8月)、C:73%(8月)、D:68%(9月)、E:71%(9月)であり、平均水分は70%である。これら水分は、冬季より夏季に多少高くなる傾向を考慮しても大きな変化はなかった。Fig.6(a)に示す5本のO<sub>2</sub>濃度の曲線は、同じ豚舎から提供されたほぼ同程度の水分の豚糞であっても、燃焼時間は試料により大きく異なることを示している。しかし、Fig.6(b)のCO濃度は、全体としてO<sub>2</sub>濃度の変化よりは変化が少ない。また、Fig.6(c)のNO濃度は、O<sub>2</sub>濃度以上に試料により大きく異なっている。これらの原因についての詳細な分析は、現状では困難である。特に、豚糞試料の元素分析が完全に成されておらず、試料中の窒素成分量は不明である。NO濃度の時間的変化の相違は、窒素成分量の違いから生ずると考えられ

るが、その原因として豚が同じ飼料を摂ったとしても、同一の豚個体の日々の代謝の変化、または豚糞試料が採取された豚個体間の代謝の変化等、多くの要因が考えられる。従って、豚糞をはじめ畜糞の燃焼特性は、この程度の変動は十分ありうることを前提に、実験結果の分析を進める必要がある。

## 5. 熱分解特性の結果及び考察

### 5.1 熱量

Fig.7に、スギチップの木炭への炭化温度が木炭の単位質量あたりの発熱量に及ぼす影響を示す。炭化温度が250℃を超えるあたりから、木炭の発熱量は上昇し始める。

また、Fig.8は、炭化温度が重量収率とエネルギー収率に及ぼす影響を示す。重量収率は、スギチップの炭化前の重量と炭化後の重量の比である。また、エネルギー収率は、スギチップが炭化前と炭化後に持っていたエネルギー（単位質量あたりの発熱量×スギチップの質量）の比で定義される<sup>6)</sup>。即ち、スギチップが当初持っていたエネルギーの何パーセントが残存するかを示す指標である。このエネルギー収率は、炭化温度が230℃あたりで低下し、280℃では約8割強、300℃では7割強となった。従って、原料木材の有するエネルギーを有効に使うことを考慮すると、200℃以下の温度で炭化するのが良いと考えられる。しかしながら、炭化による減量は輸送や取り扱いの上でのメリットでもあると考えられる。木炭と豚糞の混合物を対象とする本研究の場合には、実際の豚糞の発熱量は、乾燥豚糞（この発熱量は、18.4~19.7MJ/kg程度であった。）とは異なり、水分による補正を施さなければならない。従って、これらを総合的に判断して、豚糞の助燃材として最適と考えられる炭化温度を確定する必要がある。

### 5.2 DTAの熱分解挙動

Fig.9に、スギチップ木炭のDTA-TG曲線を示す。DTA曲線は、スギチップおよびその炭化物の一般的傾向と同様に、100℃程度までにはほぼ水分に相当する重量減少が認められる。次いで、200℃を超えるあたりから、発熱と共に重量減少が大きくなり始める。340℃前後で一つのピーク（以下、第一ピーク

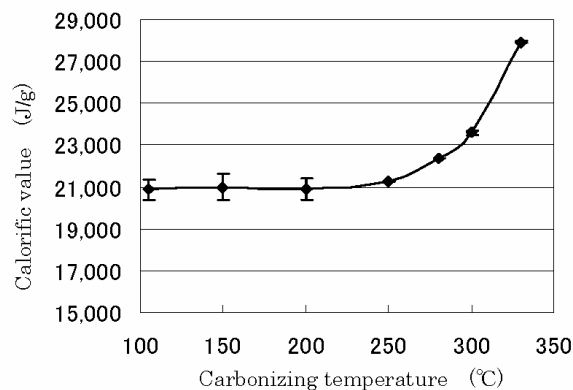


Fig.7 Calorific value of Sugi chips

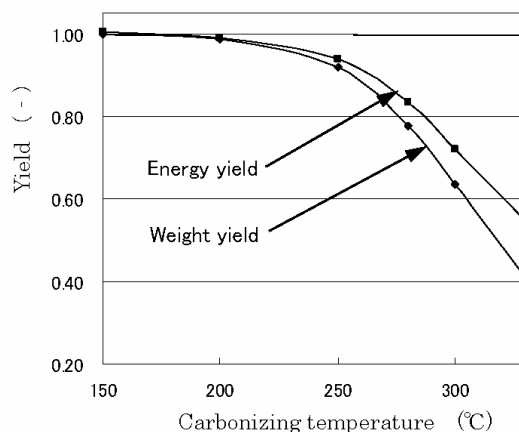


Fig.8 Yields of energy and weight of Sugi chips

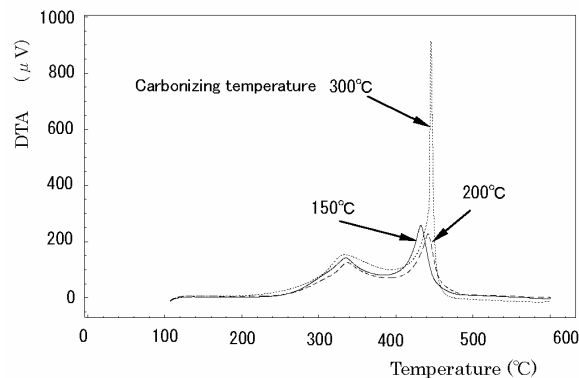


Fig.9 The DTA curves of Sugi-chips

いう)を形成し、その後に発熱は減少する。更に、390℃前後から再び発熱が増大し、発熱はその後440℃程度をピーク（以下、第2ピークという）を形成した後で再び減少し、この過程で重量が0近くまで大きく減少する。これらの現象は、第一ピークが有機成分による可燃性ガスの発生及び酸化・燃焼によるもの、第2ピークが生成された固体カーボンの燃焼によるものと考えられる。一方、Fig.10に示すように、豚糞についてのDTA-TG曲線もほぼ同様



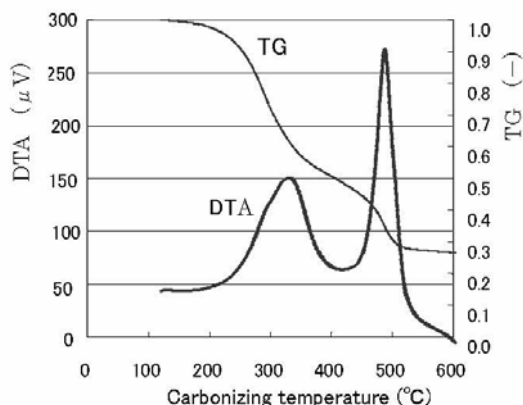


Fig.10 The DTA and TG curves of pig excrements

の結果であったが、豚糞の第2ピーク(483°C)は木炭の第2ピーク(426°C)に比べて57°C程度で高温側にシフトしている。このことから、豚糞から作られるカーボンの燃焼開始には、より高い温度を必要とすることが推測される。豚糞と同様の有機物を含む廃棄物関係の燃料である可燃性のごみ固形燃料(RDF)と参考までに比較すると、RDFの空気雰囲気中のDTA曲線<sup>7)</sup>も、Fig.9及びFig.10とほぼ同様な特性を示している。

## 6. まとめ

ベンチスケールの小型燃焼炉を用いて、高水分の豚糞と低品位木炭(粒炭)の混合燃料の燃焼特性を調べた。更に、これらのバイオマス燃料の熱分解特性についても明らかにした。得られた主な結果は、以下である。

- (1) 水分を含み燃焼速度の異なるバイオマスの混合燃料は、水分の蒸発に伴う着火時刻までの遅れや燃焼速度の相違等、複雑な燃焼特性を示す。効率的な燃焼に関しては、燃料の発熱量に加えて、燃焼速度の効果を十分考慮する必要がある。

- (2) 豚糞は、毎日同じ状態で排出されるものではない。従って、豚糞の燃焼は、ほぼ同程度の水分(約70%)であっても、燃焼時間、即ち燃焼速度には、かなりの変化が見られる。しかし、燃焼ガスのCO濃度の相違は少なく、一方、NO濃度の変化は大変大きくなっている。

- (3) 熱分解特性の結果から、豚糞のDTA曲線は、スギチップ木炭のDTAに比べて、第2ピークが高温側にシフトしている。このため、豚糞炭化物はやや着火しにくいことが推測された。

本研究の推進にあたっては、文部科学省都市エリア産学官連携促進事業「バイオマスの高度徹底活用による環境調和型産業の創出」プロジェクトにより支援を受けた。更に、実験の実施に際しては、宮崎大学工学部学生 小玉良介氏、深澤駿氏の大きな協力を得た。ここに、記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) <http://www.i-port.or.jp/area/miyakonoyo.html>
- 2) 石井國義, 西山和利, 城島一彦, エレクトロヒート, 135,(2004), 37.
- 3) 野田英彦, 深井潤, 宮武修, 他, 化学工学論文集, 27,1(2001), 21.
- 4) HA, S.J., NAMIOKA, T., et al., The 6<sup>th</sup> KSME-JSME Thermal and Fluid Engineering Conference, CD-03, (2005)
- 5) 西山嘉典, 松本昭彦, 伊藤一芳, 住友重機械技報, 158, (2005), 13.
- 6) 本庄孝子, 井田民男, 瀧端学, 他, 日本エネルギー学会誌, 84, (2005), 142.
- 7) 高黎静, 鶴田俊, 平成16年度日本火災学会研究発表会概要集, 90(2004).