

多様な豚糞と木質系バイオマスの混合燃料の乾燥特性および燃焼特性に関する実験的解析

菊地正憲¹⁾・平野公孝¹⁾・森田明宏²⁾

Experimental Study on Characteristics of Drying and Combustion for Several Kinds of Biomass-fuels

Masanori KIKUCHI, Kimitaka HIRANO, Akihiro MORITA

Abstract

Experiments are made to study characteristics of drying and combustion for many kinds of biomass which are excrement of dam swine, low-quality wood charcoal, excrement of swine littered with sawdust and semi-carbonized wood charcoal. For drying characteristics used with rotary kiln drying furnace, biomass-fuels are measured to amount of evaporation from biomass and moisture content of dried fuels. For combustion characteristics with pilot-scale combustion system, the heat balance of the system is analyzed.

Key Words:

Combustion, Drying, Unutilized Biomass, Swine Excrement, Wood Charcoal, Heat Balance

1. はじめに

文部科学省都市エリア産学官連携促進事業都城盆地エリアプロジェクト(2004年度～2006年度)においては、低品位木炭を助燃材として豚糞を燃焼させ、その熱エネルギーを温度に応じてカスケード的に有効利用を図ることを目指している。これらバイオマスの乾燥特性や燃焼特性に関して、ベンチスケール燃焼炉及びパイロットスケール燃焼システムを用いた燃焼実験および乾燥実験が実施されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

これらの実験における燃料は、**母豚豚糞と低品位木炭**を混合させ、ロータリーキルン乾燥機で乾燥させた燃料体である。しかし、実際の畜産現場では、今後、糞尿分離された母豚の豚糞より、おが粉を敷いた豚舎である程度堆肥化が進んだ肥育豚の豚糞(以下、**おが粉豚糞**)が大量に発生することが予想されている。一方、木質系バイオマスと

しても、低品位木炭よりも、より未炭化な状態の“半炭化物”および安価な“パーク炭”等、多様な木炭あるいは炭化物も存在している。

従って、母豚と低品位木炭との混合燃料に関する実験に加えて、より多様な燃料を対象とした燃焼実験を行い、以下のことを明らかにする。

- (1) 多様な種類の豚糞及び木炭(炭化物)の混合体に対するロータリーキルン乾燥機による乾燥性能を明らかにする。
- (2) 燃焼実験により、パイロットプラントシステムの燃焼特性および熱エネルギーの配分等について基礎データを収集する。

2. 多様なバイオマス対象物

都城盆地エリアプロジェクトにおいて主要燃料として燃焼させてきた豚糞と木炭には、以下の特長がある。

- (1) **豚糞**: 高含水率の豚糞の中ではあるが、糞尿が分離されて比較的含水率の少ない(75%程度)母豚の豚糞を対象としている。母豚は、その目

1) 機械システム工学科教授

2) 宮崎県産業支援財団研究員

的から通常の肥育豚と異なって栄養価の高い飼料が与えられている。当然、豚糞の成分にも飼料の影響は生じていると考えられる。

- (2) **低品位木炭**：スギの間伐材を450℃程度の低温雰囲気の中で不十分な炭化状態として作られた炭化物である。これを砕いた後に篩い、1mm以下の炭を粉炭、1mm～7mmの炭を粒炭の表記で示す。このように低品位木炭と言っても、まだまだ手間と時間がかかり、生産コストも高い状態である。

従って、本実験では、以下のように今後大量に発生すると予想されるおが粉入り豚舎の肥育豚の豚糞、また、より安価な製造方法による木炭(炭化物)を対象とした。なお、本研究では、含水率は全重量中の水分の割合として定義される。

2.1 肥育豚のおが粉入り豚糞(おが粉豚糞)

図1(a)～(d)に、おが粉豚糞の状況を示す。図1(a)は、今回使用したおが粉豚糞を乾燥炉へ投入

するホッパー内の状況を示す。比較のために、図1(b)には、おが粉を混ぜない状態の肥育豚の豚糞⁽⁵⁾を示す。これより、肥育豚の豚糞自体は、非常に高含水率であり、どろどろしていることが分かる。一方、おが粉豚糞は、おが粉を肥育豚舎に敷き、豚舎の中で堆肥化を進め、一定程度の熟成段階になり水分も低下した段階のものである。また、図1(c)は、乾燥炉から取り出された燃料体の状態を示す。比較のために、図1(d)には、母豚豚糞に粉炭を混合させた後に乾燥炉で乾燥させた燃料体を示す。母豚豚糞の場合には、平均的には5mm程の粒状であるが、おが粉豚糞の場合には、粒の大きなものも見られるが全体的にはかなり細かな粒となっている。また、黒い炭ではなくおが粉との混合のため、色は茶色となっている。

2.2 木質系バイオマス

図2には、パーク(スギ樹皮)炭を示す。比較的大きな炭片から細かな炭灰状態のものまで含まれて



(a) 乾燥前のおが粉豚糞



(b) おが粉を混ぜない肥育豚の豚糞⁽⁵⁾



(c) 乾燥後のおが粉豚糞



(d) 乾燥後の粉炭混合の母豚豚糞

図1 おが粉入り肥育豚の豚糞



図2 バーク炭



図3 半炭化炭



図4 母豚豚糞と半炭化炭の燃料体

いる。一方、図3には、半炭化炭を示す。未炭化で木質の状態となっている部分がかかなり存在している。図4には、この半炭化炭と母豚豚糞を混合し、乾燥させた燃料体を示す。この木質部は、数cmと比較的大きなチップも多く含まれている。

2.3 多様なバイオマスの特性

表1には、本実験で対象としたバイオマスの発熱量と含水率を示す。これらの数値は、最右列に記すサンプル数に関する平均値である。

乾燥ベースの発熱量は、豚糞よりも木炭の方が高くなっている。また、豚糞の含水率は、乾燥前の段階であり、母豚豚糞とおが粉豚糞とも同程度

表1 多様なバイオマス燃料の発熱量と含水率

原料の種類	対象バイオマス	発熱量	含水率	試料数
		MJ/dry -kg	%	
豚糞	母豚の豚糞	19.6	74	10
	おが粉豚糞	18.6	77	2
炭	低品位木炭(粉炭)	24.3	16	3
	低品位木炭(粒炭)	32.4	11	5
	バーク炭	27.3	58	4
	半炭化炭	25.9	65	7

の含水率になっている。

一方、バーク炭及び半炭化炭の含水率は、低品位木炭に比して、かなり含水率が高くなっている。この原因としては、バーク炭の場合には、購入の際に輸送中の安全性を考慮して水が散布されることが予想される。また、半炭化炭の場合にも、その製造の最終過程で水が撒かれており、実験はこの製造直後に実施されている。このように、バーク炭と半炭化炭を豚糞含水率の調整剤として利用する計画であったが、これらの炭は予想以上に高含水率であったために、燃焼実験としては望ましい条件での実施ができなかった。

表1に示す豚糞のデータとは別に、おが粉入り堆肥豚舎においておが粉投入後1ヶ月程度の堆肥化段階で、100日齢程度の肥育豚(子豚)の豚糞尿の水分及び灰分が、宮崎県畜産試験場で測定された。この測定のサンプル数は8であり、同一の豚舎から採取された。この結果より、水分の平均値と標本標準偏差は51.7%と26.5%であった。また、灰分についても平均値と標本標準偏差は6.3%と2.8%であった。従って、水分及び灰分の測定結果のデータのバラツキ程度は、大変大きい状況が示された。即ち、今回取扱っているようなバイオマスについては、このような基礎データ自体が、実験日によって、またはサンプルの採取箇所によって大きくバラツクことをふまえた議論が必要である。

3. 実験装置及び実験方法

本実験で用いた実験装置及び実験方法等は、母豚豚糞と低品位木炭を対象とした燃焼実験と同一である。詳細は、参考文献(2)(3)を参照されたい。

表2 多様なバイオマス混合体の乾燥特性

バイオマス 混合体の構成	混合体 (乾燥前)			燃料体 (乾燥後)				
	送り速度	送り量	含水率	生成速度	生成速度	水分の 蒸発量	含水率	発熱量
	Hz	wet-kg/h	%	wet-kg/h	dry-kg/h	kg/h	%	MJ/dry-kg
母豚豚糞+ 低品位木炭	14	48.4	63	23.2	19.0	25.2	18	23.0
母豚豚糞+ パーク炭	12	63.1	68	32.8	19.7	30.3	40	22.0
母豚豚糞+ 半炭化炭	12	56.2	70	28.1	17.7	28.1	37	21.0
おが粉豚糞+ 低品位木炭	14	44.3	70	16.4	14.6	27.9	11	23.8
おが粉豚糞のみ	12	48.2	76	13.8	11.9	34.4	14	18.6

表3 乾燥炉入口/出口の燃焼排ガスと乾燥ガスの温度 (単位: °C)

バイオマス混合体の構成	乾燥炉外筒 燃焼排ガス		乾燥炉内筒 乾燥ガス
	入口温度	出口温度	出口温度
母豚豚糞+低品位木炭	479	273	101
母豚豚糞+パーク炭	483	263	103
母豚豚糞+半炭化炭	495	268	94
おが粉豚糞+低品位木炭	476	248	86
おが粉豚糞のみ	495	254	76

4. 乾燥特性

豚糞と木炭(炭化物)の混合体は、ロータリーキルン炉により乾燥され、燃料体が製造される。表2には、さまざまなバイオマス原料による混合体の乾燥特性を示す。豚糞と木炭(炭化物)の混合割合は、乾燥ベースで6:4である。ただし、おが粉豚糞のみの場合を除く。

混合体を乾燥炉へ送り込む送り量は、ホッパーのスクリー駆動回転数 n [Hz]を送り速度として変化させて、変更される。しかし、混合体の構成の相違によりその性状は異なり、送り速度 n が大きいかからといって必ずしも送り量が多くなるとは限らない。即ち、wetベースの送り量は、混合体により大きく異なる。ただし、今回の実験では、混合

体の含水率は、おおよそ70%で同程度であった。

乾燥された燃料体の乾燥ベースの生成速度は、燃焼システム全体の持続可能性を確保する観点からは、大変重要である。実験結果からは、母豚豚糞を含む燃料体の生成速度に比して、おが粉豚糞を含む場合の生成速度は少ないことが示された。

また、混合体の構成により、乾燥後の燃料体の含水率が大きく異なることも示された。ただし、前述のように、もともとパーク炭と半炭化炭の含水率は高かったが、これらを含む燃料体の含水率も非常に高くなっている。混合体の乾燥前の含水率はほぼ同程度であったので、このことは、パーク炭または半炭化炭に含まれる水分は乾燥され難いことを示している。

表3には、乾燥炉外筒の入口/出口を通過する燃

焼排ガスの温度及び内筒出口を通解する悪臭等を含んだ乾燥ガスの温度を示す。外筒入口での燃焼排ガスの温度は、燃焼炉出口温度が800℃一定と制御されているので、485℃前後ではほぼ一定となっている。バイオマス混合体の構成による乾燥特性への影響は、内筒出口の乾燥ガス温度に顕著に表れる。実験結果より、おが粉豚糞の乾燥ガス温度は、母豚豚糞の場合に比していずれも低い。また、おが粉豚糞の場合に、外筒出口の燃焼排ガス温度も低くなっている。即ち、これは、燃焼排ガスの熱エネルギーが効果的に混合体の乾燥に利用されていることを示している。この結果、おが粉豚糞を含む燃料体の含水率は、母豚豚糞の燃料体に比して低くなる。

5. 燃焼特性

以下に示す燃焼実験では、乾燥炉で乾燥されるバイオマスの構成と燃焼炉で燃焼するバイオマスの構成は同一である。即ち、燃焼炉で燃焼させている燃料体と同じ構成の混合体を乾燥炉で乾燥させている。

表4には、燃焼炉から排出される燃焼排ガスの温度とその成分濃度（酸素 O_2 、一酸化炭素CO、一酸化窒素NO）を、エアヒーター出口で測定した結果を示す。

燃料体の構成によって、 O_2 およびCOの濃度については、大きな変化はない。しかし、NOの濃度については、母豚を含む燃料体に比して、おが粉豚糞の燃料体の場合には、60ppm程度低くなっている。即ち、今回の実験では、豚糞と木炭の乾燥ベースの重量比を6:4に固定している。この際に、おが粉豚糞の場合には、おが粉の分量だけ豚糞が実質的に減少している。また、木炭やおが粉には窒素成分(N)がほとんど含まれていないことより、おが粉豚糞を含む燃料体の燃焼排ガスについては、NO濃度が低くなる。

図5～図8には、多様なバイオマスの燃料体を燃焼させた場合に、本燃焼システム各部における測定温度およびその箇所を通過する熱エネルギー等の熱配分を計算するための基礎データを示す。ただし、各管路を通過するガス流量は、ピトー管により管軸中心流速を測定し、流れは乱流として平

表4 燃料体による燃焼排ガスの性状

燃料体の構成	温度		濃度	
	℃	O_2 [%]	CO [ppm]	NO [ppm]
母豚豚糞＋低品位木炭	458	10.4	8	150
母豚豚糞＋バーク炭	482	10.7	6	177
母豚豚糞＋半炭化炭	495	10.1	10	181
おが粉豚糞＋低品位木炭	474	11.1	8	115
おが粉豚糞のみ	483	11.2	4	106

均速度を0.8×管軸中心流速から求めた。一方、熱エネルギー算出の過程において必要となる燃焼排ガスや乾燥ガスの密度については、これを決定する正確なデータが少なく、詳細は割愛するが、いろいろな仮定に基づいて密度を設定している。図5は「母豚豚糞＋バーク炭」の燃料体を、図6は「母豚豚糞＋半炭化炭」の燃料体を、図7は「おが粉豚糞＋低品位木炭」の燃料体を、図8は「おが粉豚糞のみ」の燃焼体を燃焼させた場合をそれぞれ示す。

表5には、これらのデータを基礎に、本燃焼システム全体の中の各部における熱エネルギーの授受を計算することにより得られる熱エネルギーの分配状況を示す。ただし、燃焼炉出口における燃焼排ガスが持っている熱エネルギーを100%とし、これから各部の熱エネルギー量を差し引き、残量を放熱等の損失とした。本燃焼システムはどのような燃料体の構成であっても、燃焼炉出口温度は800℃になるように制御されている⁽³⁾ために、燃料体によって熱エネルギーの分配状況が大きく変化することにはならない。ただ、表2に示したように、バイオマス混合体の構成により乾燥機における乾燥性能が異なるので、このため乾燥炉で消費される熱エネルギーの割合が異なり、母豚豚糞よりもおが粉豚糞の方が乾燥炉で消費される熱エネルギーの割合が多少大きくなる。

6. まとめ

母豚及び低品位木炭のみならず、多様なバイオ

表5 燃焼システムにおける熱エネルギーの分配 (単位: %)

バイオマス燃焼体の構成	エアヒーター	熱交換器	乾燥炉	放熱	排熱
母豚豚糞+低品位木炭	25.5	23.8	23.7	7.1	19.9
母豚豚糞+パーク炭	26.0	20.9	25.6	6.9	20.6
母豚豚糞+半炭化炭	25.2	20.6	25.9	8.1	20.2
おが粉豚糞+低品位木炭	26.5	19.8	26.5	7.1	20.1
おが粉豚糞のみ	25.1	19.5	28.0	6.7	20.7

マス燃料体についての乾燥特性及び燃焼特性に関する実験を行った。得られた主な結果は、以下である。

- (1) 本燃焼プラントのロータリーキルン乾燥炉を用いて母豚豚糞にパーク炭または半炭化炭を混合させた混合体を乾燥させた場合に、乾燥後の燃料体の含水率は、低品位木炭を混合させた場合に比較して高含水率となっている。即ち、使用したパーク炭または半炭化炭に含まれる水分は蒸発され難い。
- (2) また、おが粉豚糞の乾燥特性に関して、乾燥炉出口における内筒の乾燥排ガス温度および外筒の燃焼排ガス温度は、いずれも母豚豚糞を含む混合体より低温となっている。即ち、乾燥炉入口で供給された熱エネルギーは、おが粉豚糞の乾燥に、より効果的に利用されている。
- (3) 多様なバイオマスで構成される燃料体の燃焼は、燃焼炉出口温度が 800℃と一定に制御されており、このため、燃焼システム全体の熱エネルギーの配分は、燃料体の構成により大きな違いは生じていない。ただし、混合体の構成により乾燥炉での乾燥特性が異なることより、母豚豚糞よりもおが粉豚糞の方が乾燥炉で消費される熱エネルギーの割合が多少大きくなる。

謝辞

本実験の実施にあたり、宮崎大学大学院工学研

究科機械システム工学専攻 瀬田宏道氏、同工学部機械システム工学科 石井裕太氏、川竹裕顯氏の大きな協力を得た。更に、宮崎県産業支援財団コーディネータ 米良博氏、長友太氏にも大きなご支援をいただいた。ここに心からの感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 菊地, 平野, 守田, 諸岩, 森田, 豚糞および木炭の燃焼特性と熱分解特性の基礎実験, 宮崎大学工学部紀要, 36, pp. 235-243, 2007.
- (2) 菊地, 平野, 守田, 諸岩, 森田, バイオマス燃料(豚糞と木炭の混合体)のパイロットスケール燃焼システムの特性解析実験, 宮崎大学工学部紀要, 38, pp. 233-239, 2009.
- (3) 菊地, 平野, 瀬田, 森田, 豚糞と木炭の混合バイオマス燃料の燃焼特性と改良された燃焼システムの熱バランス, 宮崎大学工学部紀要, 38, pp. 241-248, 2009.
- (4) 菊地, 平野, 諸岩, バイオマス燃焼炉内の燃焼ガス流動の数値シミュレーション, 宮崎大学工学部紀要, 38, pp. 249-256, 2009.
- (5) 藤本, 森田, 低品位木炭・豚糞混合試験, 「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」第2年度成果報告書, 宮崎県産業支援財団, pp. 11-14, 2006.

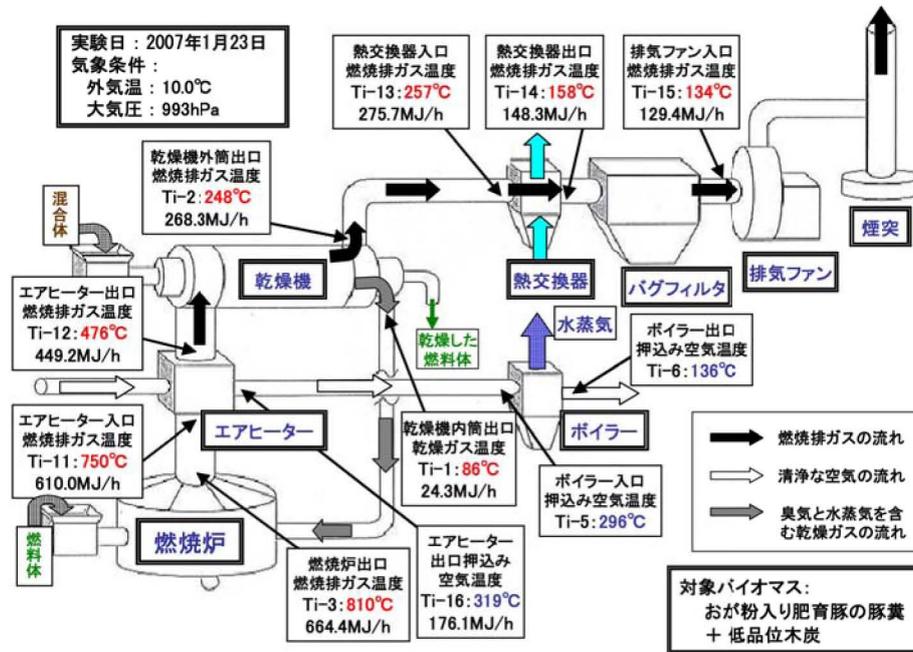


図7 システム内の温度分布と熱エネルギーの基本データ
 (対象バイオマス：おが粉豚糞+低品位木炭)

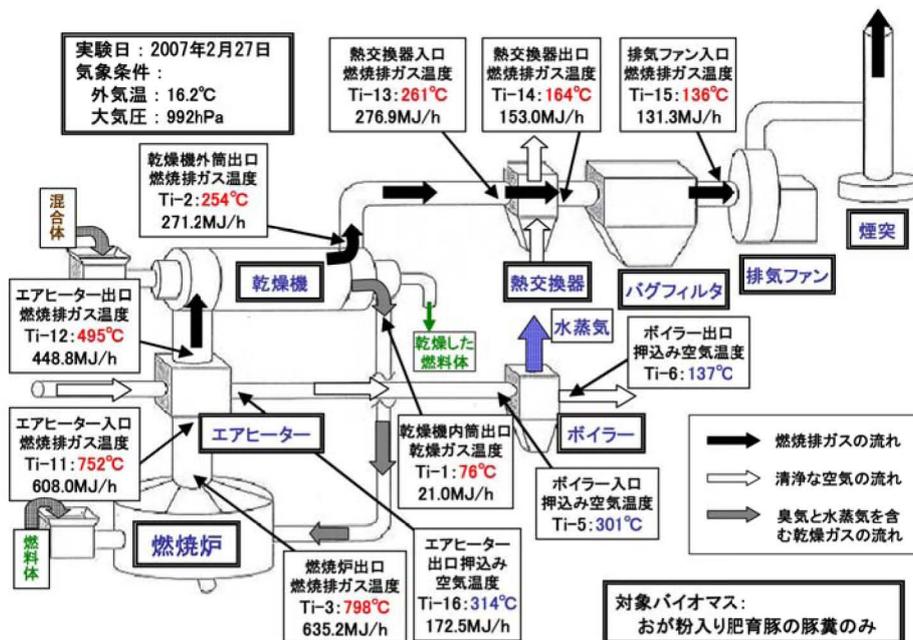


図8 システム内の温度分布と熱エネルギーの基本データ
 (対象バイオマス：母豚豚糞+バーク炭)