

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

菊地正憲¹⁾・平野公孝¹⁾・守田幸司²⁾・諸岩広大²⁾・森田明宏³⁾

Pilot-scale Testing of Combustion System for Biomass-fuel (Mixture with Swine Excrement and Wood Charcoal)

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

Abstract

This work researches the way that unutilized biomass such as high-water swine excrement and low-grade wood (Japanese cedar) charcoal is effectively transformed into thermal energy resources. This combustion system is composed of the fixed-bed combustion furnace, the preliminary drying machine of rotary kiln type, the heat exchanger, the boiler and etc. As these two biomass resources have very different combustion speeds, it is necessary to make suitable combination as biomass-fuel. At first, the “kneaded fuel” in which the swine excrement is kneaded into the charcoal dust, is dried in the drying machine. Then the “mixed fuel” in which the kneaded fuel is mixed with the granular wood charcoal, is burned in the combustion furnace. The self-sustained combustion is succeeded for the mixed fuel that the weight ratio of the swine excrement to the wood charcoal is 60:40.

Key Words :

Self-sustained Combustion, Unutilized Biomass, Swine Excrement, Wood Charcoal, Thermal Energy

1. はじめに

宮崎県都城盆地エリアでは、畜産業が高度に集積しているので、家畜排泄物の野積み禁止や地下水の窒素過多に対応するために、畜糞の適正な処理が緊急な課題となっている。一方、林業も盛んであり、多量の林地残材・土場残材等の未利用木質バイオマスの有効活用も積極的に促進する必要がある。これらの地域特有のバイオマス資源の利活用を目指し、特に、低品位木炭を助燃材として自燃の難しい高含水率の豚糞を安定して燃焼させることにより熱エネルギーを取り出し、このエネルギーの効果的カス

ケード利用を図るための開発プロジェクトが、文部科学省都市エリア産学連携促進事業都城盆地エリアとして実施された(2004年度～2006年度)⁽¹⁾。

本研究では、このプロジェクトの一環として、宮崎県畜産試験場(宮崎県高原町)に設置されたパイロットプラントの燃焼炉を用いて実際の燃焼実験を行う。このようなバイオマスの燃焼に関しては、比較的含水率の低い鶏糞の燃焼については、報告書も出されているが⁽²⁾⁽³⁾、豚糞と木炭を対象とする燃焼については、実験例もきわめて少なく、本プロジェクトの一環として、燃焼特性と熱分解特性についての基礎実験が実施されている程度である⁽⁴⁾。

対象とするバイオマスの燃焼については、それぞれの燃料の燃焼速度に注意する必要がある。即ち、乾燥豚糞や木炭は、燃焼炉内に滞留する時間内で燃え切る必要があるにもかかわらず、これらの燃焼速

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

度に大きな違いがある。特に、固体燃料である木炭の粒径の影響はきわめて大きい。

従って、本研究の目的は、パイロット燃焼システムに関して、以下の項目を明らかにすることである。

- (1) 本システムにふさわしい豚糞と木炭のバイオマス燃料を作成し、燃焼特性を計測する。
- (2) この燃料を燃焼させることにより、安定的な自立燃焼を実現させる。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置の構成

図1に、燃焼システムの機器の構成とその配置を示す。主要機器は、固定床型小型燃焼炉、燃料不足を補う補助バーナー、豚糞/木炭の予備乾燥用ロータリーキルン乾燥機、木材乾燥用蒸気発生器の熱交換器/ボイラー、また集塵機等である。

図2は、燃焼炉内の燃焼状況を示す。燃焼炉の中には、4本の腕を持つ攪拌レーキが回転している。1本の腕には、細い管のエアサプライヤが2本または3本付けられており、回転しながら燃料をかく拌する。燃焼用空気は、エアサプライヤを冷却しながら、これを通して炉内に押し込まれる。この空気は、レーキの回転方向とは反対方向の旋回流として噴出する。図2の左の炎は、炉内に投入された燃料が炎を出して燃焼していることを示している。一方、右の炎は補助バーナーが点火していることを示す。この補助バーナーは、燃焼炉出口温度が730℃になると停止する。従って、この条件を満たす自立燃焼状態では、補助バーナーは常に停止することになる。

更に、レーキからの供給空気に加えて、予備乾燥



図1 燃焼システム



図2 燃焼室内の燃焼状

の過程で発生する水蒸気と悪臭を含んだ空気も、燃焼炉にレーキからの供給空気の旋回方向と同じ方向に吹き込まれ燃焼に参加する。

2.2 燃料および燃焼ガスの流れ

本研究では、豚糞は比較的含水率の低い母豚を対象とし、宮崎県原種豚センター(宮崎県高原町)から供給される。一方、木炭はスギ間伐材を450℃で炭化した低品位木炭である。これを砕いて分粒し、1mm～7mmサイズを粒炭、1mm以下を粉炭と定義する。



図3 乾燥前の母豚の豚糞



図4 粉炭を挿入して乾燥された豚糞

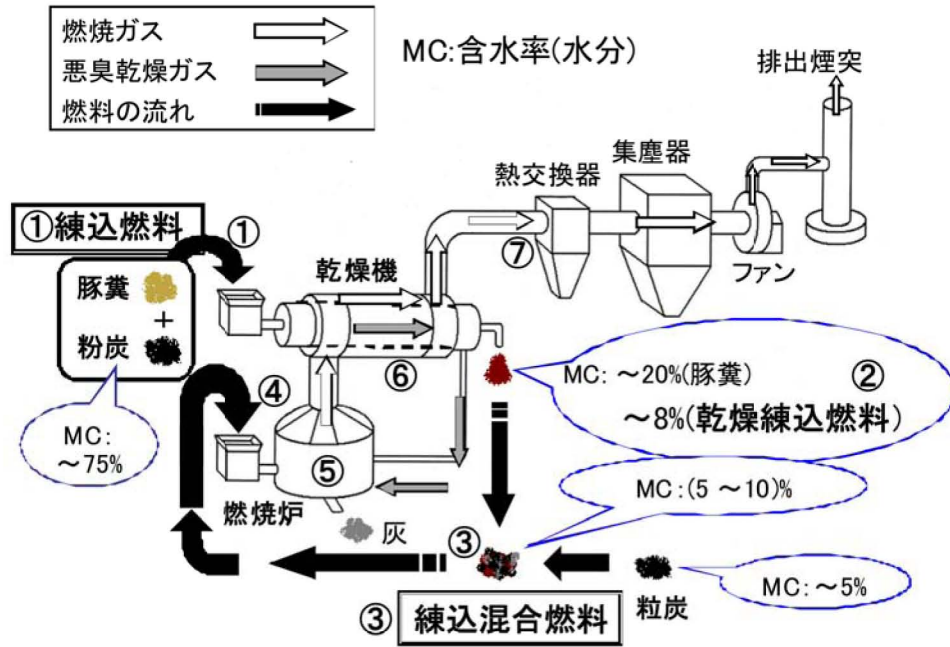


図5 燃焼システムにおける燃料と燃焼ガス等の流れ

図3には、母豚豚糞の乾燥前の状態を示す。また、図4には、これに粉炭を練り込み、乾燥した後の粒状になった状態を示す。乾燥後の平均的な粒の大きさは、約5mmとなっている。

図5には、パイロット燃焼システムにおける燃料及び燃焼ガスの流れを示す。図中のMCは含水率(水分)を示す。含水率は、全重量の中の水分重量の割合(%表示)で定義される。

(1)燃料の流れ

以下の①～④に、豚糞および木炭の燃料の流れの概要を示す。

- ①高含水率(MC~75%)の豚糞を粉炭に練り込み、練込燃料を作る。
- ②この練込燃料は、ロータリーキルン乾燥機の内側管に投入され、予備乾燥される。乾燥された練込燃料のMCはほぼ10%である。乾燥の過程で発生する水蒸気や悪臭を含んだ空気は、ファンによって高温の燃焼炉の中に吹き込まれる。
- ③この乾燥された練込燃料に粒炭(MC~5%)を混ぜて、練込混合燃料を作る。この段階のMCは、(5~10)%である。本報告では、絶乾ではなくこの含水率の状態をkg-dryと表記する。
- ④この練込混合燃料を燃焼炉に投入する。

(2)燃焼ガスの流れ

更に、以下の⑤～⑦に燃焼ガスの流れを示す。

⑤燃焼炉では、練込混合燃料が燃焼する。

⑥燃焼ガスは、燃焼炉出口から流出し、ロータリーキルン乾燥機の外側管を通過する過程で、練込燃料を乾燥するために熱エネルギーを失う。

⑦その後、燃焼ガスは、熱交換器を通してボイラー用空気を加熱し、集塵機を経由して煙突から大気に排出される。ボイラー用空気は、ボイラーで木材乾燥用水蒸気を発生させ、その後大気中へ放出される。

(3)燃焼システムの熱バランス

パイロットプラントの熱バランスを解析することは、効率的な熱エネルギー利用にとってきわめて重要である。本システムでは、燃焼炉の暖機運転時においても予備乾燥機には空焚き防止のために練込燃料が投入されること、また、乾燥豚糞は燃焼実験前にある程度の量を準備する必要があること等の特性があり、このため、自然時の各測定項目のデータだけで熱バランスを明らかにすることは困難である。燃焼炉、乾燥機、熱交換器等の各構成部分の熱バランス、更には、システム全体の熱バランスおよび物質の流れについては、別途の検討⁽⁶⁾が必要である。

2.3 実験の条件

①乾燥豚糞を基準とする燃料：豚糞は母豚を対象

にしたため、一日に供給される豚糞量には、約200kg-wet/dayと制約がある。従って、豚糞を燃焼させる実験時間を考慮し、燃料中の乾燥豚糞量を32kg-dry/hとして一定に保ち、木炭の量と粒径を変えて、燃料特性を変化させた。

- ②燃焼炉の温度制御：燃焼炉は、炉出口温度が730℃以下の場合には、補助バーナーが稼働する。逆に、炉の出口温度が730℃を越えると、補助バーナーは停止する。

本研究では、自立燃焼(自燃)を、この補助ボイラーが稼働しない状態で、安定的に継続して燃焼している状態であると定義する。

- ③ロータリーキルン乾燥機の温度制御：練込燃料の乾燥が進み過ぎ、乾燥機出口から燃焼炉に流出する空気温度が160℃を越えると、安全のために乾燥機入口で練込燃料に水が噴きかけられる。

- ④吹き込みノズル：乾燥機から発生する水蒸気や悪臭を含む空気を燃焼炉に吹き込むノズルは、細い径(51mm)で燃焼炉に連結される。このノズルは、上段または下段の位置に取付けることが選択できる。本研究では、燃焼炉内の流れの数値計算結果⁽⁶⁾を踏まえて、下段位置に固定された。

また、燃焼炉内の圧力は1ヶ所、ピトー管による空気量は3ヶ所で計測された。これらのデータは、デジタル化され保存される(KEYENCE, NR-600)。

- (2)排ガス分析：燃焼排ガス分析計(ホダカ(株), HN-1600N)により、測定項目として O_2 , CO , NO , 排ガス温度が測定され、また、 CO_2 や NO_x が演算項目として求められた。

- (3)水分計：検査対象物の水分は、乾燥減量法による赤外線水分計(ケツト科学研究所, FD-610)で測定される。

- (4)補助バーナーの稼働率：補助バーナーは、燃焼炉の出口温度(730℃)で制御され、細かく点火/消火を繰り返している。補助バーナーの点火時刻は、消火により出口温度が高温から低下し745℃になった時である。一方、消火時刻は、点火により出口温度が低温から上昇し750℃になった時である。

補助バーナーの稼働率は、測定時間に対して、点火時刻から消火時刻までのバーナーが稼働していた時間の割合で定義される。炉出口温度の時間変動は上記(1)により計測/記録され、このデータから補助バーナーの稼働率が計算される。

2.4 計測される諸量と計測方法

- (1)温度, 圧力等の計測：温度計測は、熱電対により燃焼炉内で7ヶ所、配管系で5ヶ所測定される。

3. 豚糞と木炭の組成変化が燃焼へ及ぼす影響

表1に、燃焼炉に投入される燃料組成等の条件を

表1 供給される燃料の条件

実験番号	燃料の種類	燃料組成の重量比	燃料の供給量 [kg-dry/h]			
			総量	豚糞	粉炭	粒炭
1	混合燃料	8:2	40	32	—	8
2	混合燃料	6:4	53		—	21
3	練込燃料	8:2	40		8	—
4	練込混合燃料	6:4	53		8	13
5	練込混合燃料	6:4	53		8	13

表2 実験結果の一覧

実験番号	燃料の種類	燃焼炉中心の温度 [℃]		補助バーナーの稼働率 [%]	灯油の消費速度 [0/h]
		平均温度	最低温度		
1	混合燃料	831	731	70	8
2	混合燃料	831	772	45	4
3	練込燃料	834	787	51	6
4	練込混合燃料	859	806	34	3
5	練込混合燃料	880	843	0	0

示す。実験を行った経過順に、左列の番号が実験1から実験5と記されている。ただし、燃料組成の重量比は、豚糞と木炭の重量割合(以下、割合)を示す。また、表2には、各実験に対応して、変動する炉中心部の測定温度に関して時間平均温度とダイオキシン対策で重要となる最低温度、また、補助バーナーの稼働率と補助バーナーの灯油消費速度の一覧を示す。

本研究では、一連の実験を進める際に結果の比較検討が明確になるように、乾燥豚糞の供給量を32kg-dry/hになるように固定した。この32kg-dry/hは、母豚豚糞の供給量や予備乾燥機の性能等を考慮して設定された。従って、燃料組成で変化させることができる要素は、木炭の供給量と粒径(粉炭、粒炭)のみである。以下に、各実験の特長を示す。

(1) **実験1**：乾燥豚糞と粒炭を単に燃料フィーダで混合させた燃料を混合燃料と称する。豚糞と粒炭を混合する割合は8:2、全体の燃料供給量は40kg/hである。この場合には、燃料の発熱量が不足状態であり、補助バーナーの稼働率も約70%となっている。

(2) **実験2**：燃料の発熱量を高めるために、粒炭の割合を増やし、豚糞と粒炭の割合を6:4とした。しかし、粒炭を多く供給し過ぎると、粒炭の固体燃焼として典型的に遅い燃焼速度のために、直ぐには燃えきれず、粒炭が燃焼炉内に堆積する。

(3) **実験3**：燃焼速度を改善するために、粒炭の代わりに粉炭が用いられた。ただし、粉炭を直接燃焼炉に投入すると、燃焼炉内には火の粉が舞い、未燃焼の粉炭が燃焼炉下流部に流出し、危険な状況となる。このため、粉炭に高含水率の生豚糞を練り込み予備乾燥させた。この燃料を、練込燃料と称する。豚糞と粉炭の重量比は実験1と同じ8:2であるが、粉炭は大変嵩高い。正に、粉炭に豚糞を力をこめて練り込む必要がある。粉炭の使用により、練込燃料の予備乾燥性能は改善され、かつ、燃焼速度も著しく速くなった。しかし、実験3の粉炭の量では発熱量不足であり、補助バーナー稼働率も50%を越えてしまう。また、これ以上の粉炭に豚糞を練りこむことは、人力による作業のため、きわめて困難である。

(4) **実験4**：豚糞と粉炭の練込燃料に対して、燃焼炉への供給ホッパーで粒炭を混合させ、発熱量の

増強を図った。この燃料を練込混合燃料と称する。乾燥豚糞と木炭(粉炭と粒炭の合計)の重量比は、6:4である。このときの練込混合燃料の低位発熱量は、23.2MJ/kg-dryとなっている。木炭の量を増加させることにより、補助バーナーの稼働率は34%、灯油消費速度も3ℓ/hと低下し、これらを0にする研究目標に近づいた。

(5) **実験5**：実験4と同じ練込混合燃料(乾燥豚糞と木炭の重量比6:4)を用いる条件で、実験を行った。前日に行った実験の余熱(図9)を利用し、プラント全体の暖機運転時間が実質的に十分確保されたことにより、補助ボイラー稼働率と灯油消費速度が0となる状態の安定的な継続、即ち、自然に到達することができた。この自然状態での詳細なデータは、4節において示される。

4. 自然状態の燃焼結果

自然している状況下での実験結果を、以下に示す。燃焼炉に投入された燃料は、3節で示したように、はじめに乾燥豚糞:粉炭=8:2(重量比)となる練込燃料が作られる。次にこれに粒炭を混合させた練込混合燃料が、最終的に乾燥豚糞:木炭=6:4(重量比)となるように調整される。

燃料投入ホッパーの送りの回転速度を変化させることにより、燃料供給量を変化させることができる。例えば、燃料供給量が53.3kg/hの場合には、乾燥豚糞31.5kg/h、木炭21.3kg/h(粉炭8kg/h、粒炭13.3kg/h)である。また、この自立燃焼時において、乾燥機から燃焼炉に吹き込まれる排ガス量は約237kg/h、レーキのエアサプライヤからの供給空気

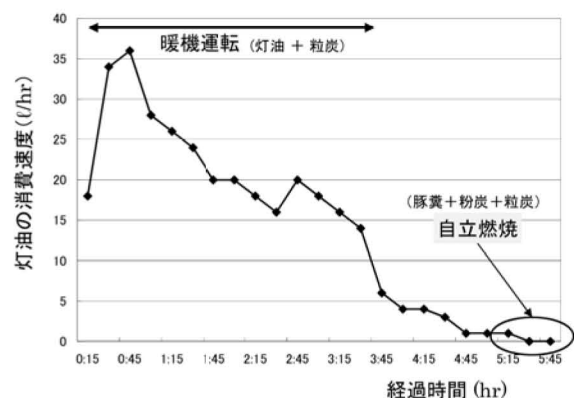


図6 灯油の消費速度

量は約108kg/hとなっている。

4.1 自燃状態の基礎データ

図6には、燃焼炉の点火以降の時間経過に対する補助バーナーの灯油消費速度を示す。冷えている燃焼炉の点火後、4,5時間の暖機運転が必要となる。この期間の燃料は、補助バーナーの灯油と粒炭である。初期の灯油消費はきわめて大きくなるが、粒炭の燃焼が始まる時間から灯油の消費は減少する。暖機運転後に、豚糞・木炭の練込混合燃料が投入され、豚糞や粉炭の燃焼が開始される。すると、更に灯油の使用量は減少する。引き続き出口温度が上昇し、ついに、補助バーナーが停止し続けると、自立燃焼状態となる。このときの出口温度の平均は、約760~770℃が維持されている。また、燃焼炉中心温度の平均は、860~880℃となっている。燃焼ガスのダイオキシン対策の基準(850℃以上の領域を2秒以上滞留)の観点からは、温度については満足していることを確認できた。即ち、燃焼ガス的高温領域の通過時間の実測は困難であるので、燃焼を伴う流れ場

の数値シミュレーションの結果⁽⁶⁾を参考にすると、2秒以上の確保は可能となっている。

更に、図7には、燃焼炉の出口温度の時間的変化を示す。出口温度は、ある明確な周期(約2.1分)を持って変動していることが示されている。一方、レーキの回転に関わって、レーキの回転数×レーキの本数(4本)に基づく周期も、ほぼこれと同一である。即ち、図2の左に見える炎で表されている燃料の投入箇所をレーキが通過する際に燃料がかく拌され、燃焼が一層促進される。この温度変化が、出口温度の周期的な変化として現れていると考えられる。

図8には、燃焼ガスに含まれるCO[ppm], NO[ppm], O₂[%]の分析結果を示す。測定箇所は、燃焼炉とロータリーキルン乾燥機の間であり、濃度表示は、左軸%と右軸ppmである。各成分は時間と共に細かく変動しているが、いずれも環境基準を満たしている。

また、自燃状態では、燃焼炉の出口温度は常に730℃を越えている。パイロットプラント燃焼システムの下流側の状態、特に、集塵機のバグフィルターの耐熱性(200℃)等に対する安全の観点から、炉の出口温度の上限管理が必要となる。本システムでは、燃料の投入量を減少させることでこれに対応している。表3は、燃料投入速度を減少させた場合の燃焼炉内の出口温度と炉中心温度の最高値や平均値を示す。炉中心での温度の最高値と最低値の変動幅は、約70℃もあり、大変大きくなっている。また、燃料投入量の変化に対する温度変化は、大変ゆっくりとしたものとなっている。このため、燃焼炉出口温度を燃料の供給速度でコントロールすることは、安全上迅速な対応を求められる温度制御のためには、実際的には不可能であると考えられる。従って、制御用の灯油補助ボイラーとの併用が必要であろう。

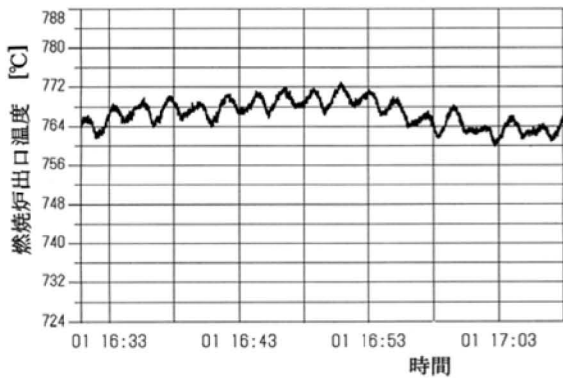


図7 燃焼炉出口温度の時間的変化

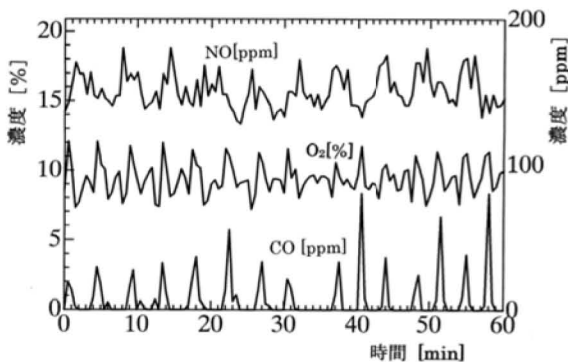


図8 燃焼ガス組成の時間的変化

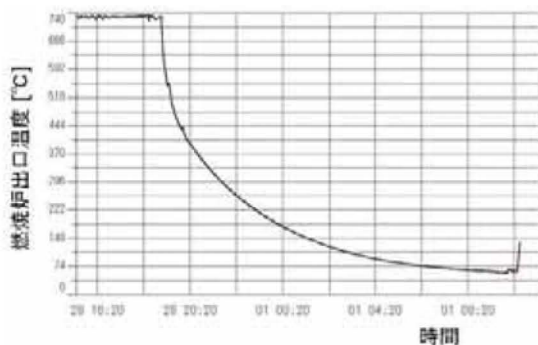
表3 燃焼炉内の温度

燃料の供給速度 [kg-dry/h]	53.3	42.8	42.3	
燃焼炉出口温度 [°C]	最高温度	797	773	769
	平均温度	775	764	765
燃焼炉中心温度 [°C]	最高温度	919	885	880
	平均温度	880	859	858
	最低温度	843	827	847

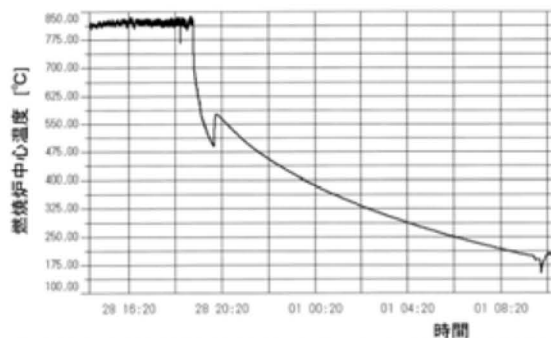
4.2 燃焼炉の停止後の炉内温度の変化

本パイロットプラント燃焼システムが実用化される場合には、連続運転が基本となる。しかし、今回の試験研究のような場合には、実験終了後は燃焼を停止しなければならない。図9(a)(b)には、燃焼停止後の時間の経過による炉内温度の変化を示す。図9(a)は出口温度である。また、図9(b)は炉中心温度であり、炉が冷えていく途中において燃焼炉のバルブの自動開閉による温度変動も記録されている。燃焼終了時刻の2006年2月28日19時過ぎから炉内温度は低下を始める。しかし、燃焼炉の熱容量は大変大きいので、温度の低下は急速ではない。このため、翌朝8時での炉出口温度は66°Cもあり、更に、炉中心では220°Cときわめて高い温度が保持されている。

本研究での数回の実験では、完全に燃焼炉が冷え切った状態から実験を開始しており、このため暖機運転に多くの時間と燃料が消費されている。しかし、実用連続運転においては暖機が不要であり、バイオマス燃料の一層の有効利用が期待される。



(a) 燃焼炉出口温度



(b) 燃焼炉中心温度

図9 燃焼停止後の燃焼炉内の温度変化

5. まとめ

高含水率の豚糞を低品位木炭を助燃材として燃焼させるパイロットプラントを用いて、燃焼実験を行った。その結果、豚糞と木炭の組成が6:4(重量比)で構成される練込混合燃料について、自立燃焼を実現させた。

また、自立燃焼に至る過程の詳細なデータを収集でき、今後の効率的な燃焼システムの開発に有益な基礎資料を得ることができた。

謝辞

本研究は、文部科学省都市エリア産学連携促進事業都城盆地エリア(平成16年度～平成18年度)による支援を受けた。また、燃焼実験を実行するにあたっては、工学部機械システム工学科学生の内山和彦君、田中健治君、および宮崎県産業支援財団のコーディネーターの方々のきわめて大きな協力を得た。ここに記し、感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 平野, 菊地, 他, パイロットスケール燃焼システムの基本設計, 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1年度成果報告書), 宮崎県産業支援財団, pp. 21-24, 2005.
- (2) 莫, 他, 畜産廃棄物発電システムにおける流動床炉フリーボード内部の燃焼ガス温度, 化学工学論文集, 28-6, pp. 661-665, 2002.
- (3) 今田, 炭素循環と環境保全を実現する森林バイオマス・畜産廃棄物発電による地域振興, 文部科学省科学研究費補助金(地域連携推進研究)研究成果報告書, 2002.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.