

## 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

菊地正憲<sup>1)</sup>・平野公孝<sup>1)</sup>・瀬田宏道<sup>2)</sup>・森田明宏<sup>3)</sup>

### Combustion Characteristics for Mixture of Bio-mass Fuels and Heat Balance of the Improved Combustion System

Masanori KIKUCHI, Kimitaka HIRANO, Koudou Seta, Akihiro MORITA

#### Abstract

The combustion system for mixture of bio-mass fuels was improved to be set air heater between the combustion furnace and the rotary dry kiln. Then, thermal energy for the boiler is gotten from combustion gas of higher temperature. Furthermore, the temperature at the entrance of the dry kiln become to lower, and production of tar in drying air is avoided. To calculate of energy balance of this system, velocities and temperature of air in ducts are measured at 6 positions and 16 points. Results for a long-term (24 hours) testing is compared to results of short-term (6 hours) testing. About 40 % of input energy is able to get out from this combustion system to the external system as thermal energy.

Key Words :

Combustion, Unutilized Biomass, Swine Excrement, Wood Charcoal, Thermal Energy, Heat Balance

#### 1. はじめに

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(2004年度~2006年度)において、固体燃焼を行なう木炭と高含水率である豚糞という性状の全く異なる二つの未利用バイオマス燃料とし、燃料自体が持つエネルギーにより安定的に自立燃焼させることのできる燃焼炉システムの開発が進められた。即ち、宮崎県畜産試験場(高原町原町)にパイロットプラント燃焼システムが設置され、基礎的な燃焼実験が行われた<sup>(1)</sup>。また、関連して、燃焼炉内のガス流動の数値シミュレーション<sup>(2)</sup>や多様な豚糞または木炭の乾燥/燃焼特性等<sup>(3)(4)</sup>に

についても明らかにされている。

この基礎実験では、ロータリーキルン乾燥機(以下、乾燥機)における高含水率の豚糞の乾燥を優先的に行った。その結果、高温の燃焼排ガスを直接乾燥機の熱源として導入できる反面、高温過ぎる乾燥のために豚糞等が焦げてタールが発生し、悪臭を含む乾燥ガスを燃焼炉へ導く管路内壁に付着するという問題点も明らかとなった。

このため、本研究では、パイロットプラントに対する改修・補強を行った上で、燃焼炉システムにおける混合燃料体の安定的かつ効率的な燃焼のためのより適切な燃焼条件を検討する。即ち、補助燃料である灯油の消費速度を自燃および安定的な燃焼の判断基準として、以下のことを明らかにする。

(1) 乾燥機へ混合体の送り量、燃焼炉への燃料体の送り量等に関する効率的燃焼条件を検討する。

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

- (2) 燃焼実験に際して、24時間長時間燃焼運転と短時間(約6時間)燃焼運転を行い、両運転方法による燃焼結果の比較検討を行い、短時間実験の役割りおよびその有効性を明らかにする。
- (3) 燃焼システム全体の熱配分シートを作成し、熱エネルギーのカスケード利用の可能性について基礎データを得る。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 燃焼システムの改良点

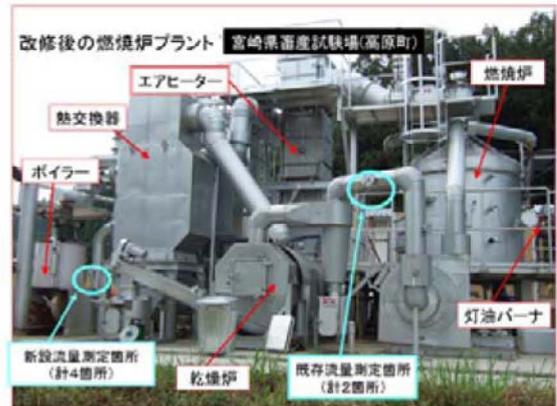
実験対象である燃焼システムの詳細は、参考文献(1)に示す。

- (1) エアヒーターの設置: 増設されたエアヒーターは、燃焼炉と乾燥炉の間に設置する。即ち、高温の燃焼排ガスは燃焼炉から流出し、エアヒーターにより熱交換され、熱エネルギーを失う。一方、新鮮な空気は、エアヒーターに押し込まれ(以下、押し込み空気)、そこで加熱されて下流のボイラーに導かれ、木材乾燥用の水蒸気を発生させる。これにより、乾燥機への流入温度を約460℃に下げ、バイオマスを高温乾燥する際に乾燥ガス中でのタールの発生を防ぐ。

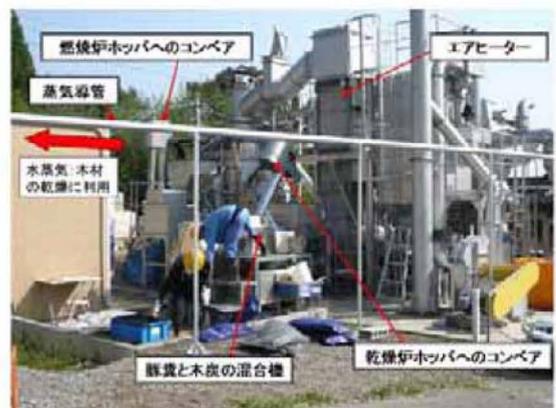
図1(a)(b)には、改修後のプラントの全体図を示す。図(a)はシステム正面図、図(b)は背面図を示す。

- (2) 流量計測用ピトー管の増設: プラントの熱収支

等を分析するために、各配管内を流れるガスの流量計測用ピトー管を増設した。これにより、流速6ヶ所、温度16ヶ所の測定が可能となった。



(a) 正面図とエアヒーター



(b) 背面図と混合機

図1 燃焼システムの全体構成図

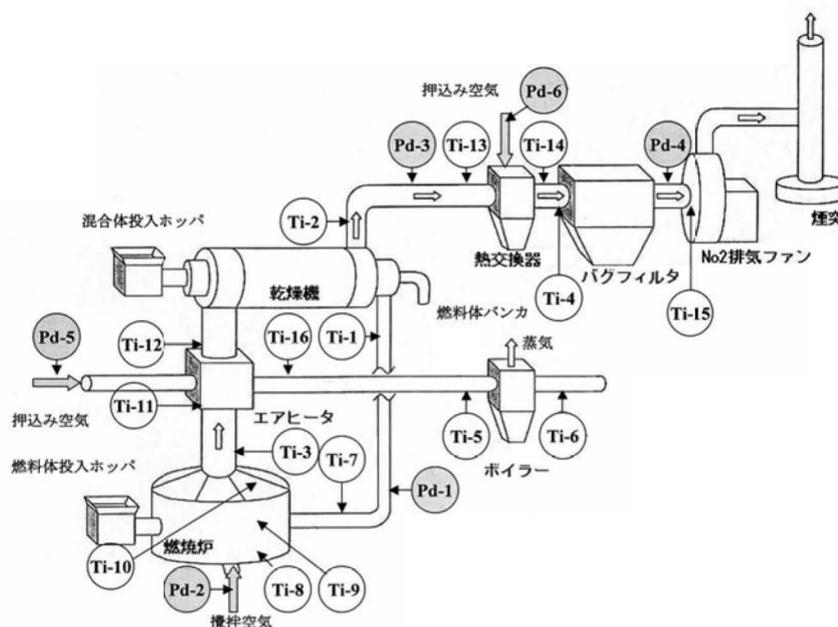


図2 流速と温度の測定箇所

図2には、温度(Ti-1~Ti-16)および速度(Pd-1~Pd-6)の測定箇所を示す。

- (3)バイオマス混合機の設置:豚糞と木炭を混合させる作業を人力で行うことは、量的に限界がある。このため、混合機(サンコーテクノ, MGM150KT-52S型)を設置した。図1(b)には、この混合機の運転風景も示されている。

## 2.2 温度および流速の測定方法

図2に示した温度および流速の測定方法は、温度(Ti-1~Ti-16)は熱電対により、また燃焼排ガスや押し込み空気等が流れる管路の中心軸上の流速(Pd-1~Pd-6)はピトー管により測定された。管路内の流れは乱流として、体積流量は管中心軸上速度の0.8倍に管断面積を掛けることにより計算される。

## 2.3 バイオマス燃料

- (1)豚糞:実験では、宮崎県原種豚センター(高原町)の母豚の糞が使用された。母豚10サンプルの平均の含水率と発熱量は、74%と19.6MJ/dry-kg(105°C, 約16時間乾燥)である。また、乾燥豚糞の元素分析の結果は、C 42%, H 6%, O 31%である。
- (2)低品位木炭:備長炭等の炭化温度は約600°C以上であるが、低品位木炭はスギ間伐材を約450°Cの低い温度で炭化される。これを砕き、粒炭(粒径:1~7mm)と粉炭(粒径:0~1mm)に篩われる。その結果、粒炭は約60%、粉炭は約35%の重量比割合となる。粒炭5サンプル平均の含水率と発熱量は、11%と32.4MJ/dry-kgである。また、粉炭3サンプル平均の含水率と発熱量は、16%と24.3MJ/dry-kgである。木炭の元素分析結果は、C 87%, H 2%, O 10%である。
- (3)混合体:生豚糞と低品位木炭を乾燥重量比として、豚糞:粉炭:粒炭=60:25:15で混ぜたものである。混合体の含水率は、60~70%程度である。混合体の乾燥機への送り量は、乾燥機ホッパーの回転数 $n$ により制御される。
- (4)燃料体:混合体を乾燥機において乾燥させたものであり、燃焼炉での燃料となる。燃料体の燃焼炉への送り量は、燃焼炉ホッパーの回転数により制御される。燃料体23サンプル平均の含水

率と発熱量は、18%と23.0MJ/dry-kgである。また、燃料体の密度は約0.356kg/m<sup>3</sup>である。

## 2.4 パイロットプラントの運転方法

- (1)短時間運転:短時間運転では、暖機運転を約4.5時間行う。この間の燃料は、灯油および粒炭である。その後、上記の燃料体の燃焼による運転を1.5時間以上継続する。短時間運転は、2日連続して実験が実施される。即ち、1日目の実験終了後に燃焼を止めて、2日目の朝に再び燃焼を始める。このように実験条件が異なるので、それぞれ以下の表示を用いる。
- ・短時間運転①:1日目の運転であり、プラントは完全に冷却状態から暖機運転を開始する。
  - ・短時間運転②:1日目の燃焼が停止しても、プラントは直ぐには冷却されない。このため、2日目の実験開始時でもプラント全体が少し温まっている状態で暖機運転が始まる。
- (2)長時間運転:暖機運転を10時間程行い、プラント各部、特に燃焼炉の炉内および炉壁の温度が十分定常状態に近いと考えられる段階を経て、燃料体を9時間以上燃焼させる実験である。全体で24時間程の長時間の運転となる。実用化された場合の連続運転に近い状態での燃焼状況の把握を目指す実験である。しかし、実験実施に伴う安全性の確保や豚糞等の準備がかなり大掛かりとなり、実験回数はきわめて限定的にならざるを得ない。長時間運転で得られる結果は、短時間運転の結果の有効性等を検討する基準となる。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 混合体の乾燥特性

乾燥機に投入された高含水率の混合体の水分が乾燥炉内でどの程度蒸発させられるかは、プラントの性能を検討する際に非常に重要となる。このため、豚糞と低品位木炭の乾燥重量ベースの構成比を6:4に固定し、燃焼炉出口温度800°C、乾燥機入口温度約480°C、乾燥機外筒出口温度約280°Cおよび乾燥機内筒出口温度約100°Cに設定した。この条件下で、混合体の乾燥機への送り量を変化させ、混合体の乾燥特性を分析した。なお、乾燥機キル

ン筒の駆動回転数は、3.95rpmで一定である。

#### (1) 混合体の含水率の影響

表1は、乾燥機ホッパーの回転数を一定( $n=12\text{Hz}$ )にした場合に、乾燥後の燃料体の含水率への影響を示す。実験①と②の場合は、含水率が低く乾燥機ホッパー内で混合体がブリッジを形成し、送り量が大幅に減少し、その結果、燃料体の生成速度も大きく低下する。また、③～⑦の結果より、混合体の含水率が高くなるにつれて、 $n$ が一定であってもwetベースの混合体送り量は大きく増加する。一方、それに伴い水分の蒸発量も大きく増え、燃料体の生成速度はほぼ同程度となる。

#### (2) 混合体の送り量の影響

表2には、乾燥前の混合体の含水率がほぼ等しい条件で、混合体の送り量が乾燥特性に及ぼす影響を示す。ただし、乾燥効率とは、混合体の送り量1kgあたりの水分蒸発量である。表2より、混合体の送り量を増やし過ぎることにより、乾燥効率は低下してしまう。また、水分の蒸発量自体は混合体の送り量にかかわらず、ほぼ同じである。更に、混合体の送り量を増加させると、燃料体の生成速

度は、含水重量(wet-kg)では格段に増加しているが、乾燥重量(dry-kg)ではあまり変わらない。即ち、単純に混合体の送り量を増加させても、含水率の高い燃料体が多く生成されるだけである。この含水率の高い燃料体を燃焼炉に投入しても、燃焼により生じた多くの熱量が水分の蒸発潜熱として奪われ、結果として燃焼炉内の温度が下がってしまう。従って、乾燥機ホッパーの回転数が $n=16\sim 18\text{Hz}$ では、目標としていた含水率20%以下の燃料体を得ることはできない。このため混合体の送り量の回転数は14Hzの場合(混合体送り量 53.3 wet-kg/h)が、燃料体の含水率および生成速度から判断して望ましい。

以上のように、燃料体の特性は、混合体の含水率、即ち、その日の生豚糞の状態により大きく影響を受ける。このため、実験日の生豚糞の含水率をベースに混合体の乾燥機への送り量を決定する必要がある。

### 3.2 燃料体の燃焼特性

図3は、横軸に燃料体を投入してからの実験経過

表1 混合体の乾燥特性に及ぼす含水率の影響

番号	混合体含水率	混合体送り量 wet-kg/h	燃料体含水率	燃料体生成速度 wet-kg/h	燃料体生成速度 dry-kg/h	蒸発量 kg/h
①	59.4%	23.6	16.6%	11.5	9.6	12.1
②	61.0%	26.8	16.0%	16.0	13.4	14.4
③	62.3%	48.4	17.9%	22.2	18.2	26.2
④	62.4%	50.6	18.3%	23.0	18.8	27.3
⑤	64.6%	51.3	21.4%	22.2	17.4	28.2
⑥	69.2%	63.4	15.0%	23.1	20.4	40.7
⑦	69.4%	66.5	23.6%	26.7	20.4	39.8

表2 混合体の乾燥特性に及ぼす送り量の影響

$n$ Hz	混合体含水率	混合体送り量 wet-kg/h	燃料体含水率	燃料体生成速度 wet-kg/h	燃料体生成速度 dry-kg/h	蒸発量 kg/h	乾燥効率
12	62.3%	48.4	17.9%	22.2	18.2	26.2	54.1%
14	62.4%	53.3	17.8%	24.4	20.1	28.9	54.2%
16	62.7%	65.4	31.8%	35.8	24.4	29.1	44.6%
18	61.0%	66.8	35.0%	38.0	24.7	28.8	43.1%

表3 プラント運転方法の違いによる燃焼状況の変化

	燃料体 投入量	燃焼炉壁 外側温度	Ti-3	Ti-8	Ti-9	Ti-10	灯油 消費量	燃焼排ガス成分		
								O <sub>2</sub>	CO	NO
	kg/h	℃						ℓ/h	%	ppm
短時間運転①	51.9	110	817	826	854	838	6.0	11.2	8	146
短時間運転②	51.9	140	821	845	856	841	2.0	11.4	9	164
長時間運転	39.0	160	816	829	839	835	5.6	12.7	10	131

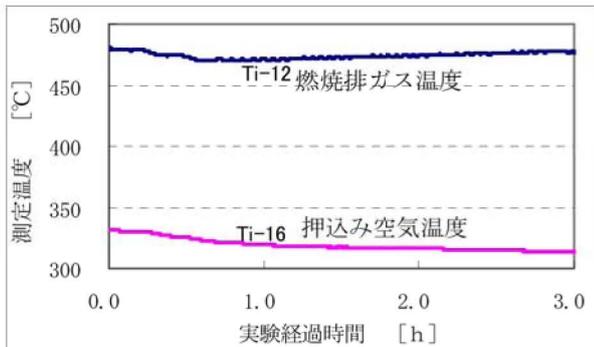


図3 エアヒーター出口における燃焼排ガスと押し込み空気の温度の時間的变化

時間を、縦軸にエアヒーター出口の燃焼排ガス(Ti-12)と押し込み空気(Ti-16)のそれぞれの測定温度を示す。図3から、燃料体の投入後0.8時間までは、Ti-12, Ti-16のどちらの温度も低下する。しかし、0.8時間以降では、燃焼排ガスの温度は上昇し、反対に押し込み空気の温度は低下する。この原因について、以下のことが考えられる。

- ①燃料体の投入時刻から0.8時間までの状態:まず、暖機運転時の燃料は粒炭と灯油であり、その後はほぼ燃料体のみとなる。これにより、燃料の発熱量が約20%減少し、燃焼排ガスの温度も低下すると考えられる。また、燃料体の燃焼により助燃バーナーの出力が低下し、助燃バーナーから押し込まれる空気量が減少する。従って、燃焼炉内の燃焼排ガス流量も減少し、プラントの管路系を流れる熱量も減少するためである。
- ②0.8時間以降の状態:0.8時間以降では、燃焼排ガスと押し込み空気の温度は逆の傾向を示す。この原因は燃焼灰によるものと推測される。即ち、エアヒーターの周囲に燃焼灰が詰まり、熱交換効率が低下すると考えられる。

以上のことにより、これらの対策として、燃料体自体の発熱量の低下を防ぐには、燃料供給速度を

上げることで改善できる。また、助燃バーナーから押し込まれる空気流量の低下は、かく拌レーキから取り込まれる空気量を増やすことで解決できる。しかし、そのためには燃焼炉内圧力を負圧に保つために誘引ファンの出力を上げる必要があり、ファンの定格出力を越える可能性が出てくる。その上、必要以上の空気を燃焼炉へ送ることにより、効率の悪い燃焼となってしまいう可能性もある。

### 3.3 プラント運転方法と燃焼炉の炉壁温度

表3は、プラントの運転方法が燃焼状況に及ぼす影響を示す。

長時間運転は、本プラントの実用的な継続運転に近い燃焼状況を把握する上で、きわめて重要である。十分な時間の暖機運転の後に燃料体による燃焼が始まった。しかし、短時間運転と同量に供給される燃料体のエネルギーは、全て燃焼排ガスの温度上昇に使われることとなり、燃焼排ガス温度は燃焼炉出口温度の上限設定値830℃を越え、助燃バーナーによる制御が不能となった。このため、安全面より燃料体の供給量を減らし、39.0kg/hとした。表3の長時間運転時の助燃バーナーによる灯油使用量が多いことは、この理由による。従って、燃料体供給量の違いにより、短時間運転時のデータとの直接的な比較は困難となったが、炉壁等を温める暖機効果の時間的経過が明らかにされ、短時間運転時のデータの有効性を確認する意味で、重要な成果が得られた。即ち、プラント各部の内部温度は、短時間運転と長時間運転では大きな差異はなく、短時間運転の有効性が示された。一方、燃焼炉の炉壁外側温度については、短時間運転時の暖機の不十分さが現れている。

短時間運転①と②の燃料体投入量は、51.9kg/hである。短時間運転①の炉壁外側温度は、灯油消費量が多いにもかかわらず、暖機の不十分さのために

短時間運転②の場合に比べて低い。また、短時間運転①では、長時間運転と同じ炉内温度を保つためには、約12kg/hも多く燃料体を投入する必要がある。これは、実用的な継続運転を目指す上で、乾燥機の性能上好ましくはない。

一方、短時間運転②の灯油使用量は、短時間運転①や長時間運転よりもきわめて少なく、自立的燃焼に近い状態となっている。即ち、完全に灯油使用量0の自立運転は実際上では困難であり、燃焼炉出口温度(Ti-3)の制御のために助燃バーナは20/h程度の灯油を必要としている。また、燃焼炉出口温度を制御可能な範囲に留めるために、燃料体の投入量を制限する必要性が明らかとなった。短時間運転②は、長時間運転または継続的な運転時の燃焼状態を再現していることが確認された。

### 3.4 燃焼排ガスの熱エネルギーの効果的な利用の検討

#### (1) エアヒーター設置の効果

本研究に関わる基礎実験<sup>(1)</sup>では、高温の燃焼排ガスを直接乾燥機外筒に導き、その後に熱交換器を介して外気の空気を温め、ボイラーにより水蒸気を発生させた。しかし、本研究では、前述のように燃焼炉と乾燥機の間エアヒーターを設置し、燃焼排ガスのエネルギーを木材乾燥用の水蒸気を発生させるエネルギーに変換する過程へと改善が図られた。

基礎実験結果より、押込まれた外気の温度はボイラー入口で約130℃、出口で約110℃であり、この温度差で発生する水蒸気量は約3.90/hであった。一方、エアヒーター設置の改修により、押込み空気(空気量759kg/h)のボイラー入口温度は267℃、出口温度は178℃と高温になる(図4)と共に、入口出口の温度差も大きくなっている。この結果、ボイラーからの水蒸気発生量が3.90/hから320/hへ

と大きく増加した。これらのことより、エアヒーター設置は水蒸気発生に対してもきわめて効果的であることが示された。

#### (2) エアヒーターへの押込み空気量の影響

持続運転のためには、乾燥機による燃料体の生成速度と燃焼炉での燃料体の消費速度とのバランスを実現させる必要がある。そこで、エアヒーターへの押込み空気量(従って、水蒸気発生に使う熱量)を減らすことにより、混合体を乾燥機で乾燥させるために必要な熱エネルギーの供給量を増加させ、乾燥機における混合体の乾燥効率の向上を検証した。

表4は、この結果を示す。ここで、燃焼排ガスの温度に関して、エアヒーターの入口での温度が(Ti-11)であり、出口での温度は(Ti-12)である。また、押込み空気の温度に関して、エアヒーターの入口での温度は外気温と同じであり、出口での温度は(Ti-13)である。ただし、燃焼炉出口温度は、800℃で一定である。混合体の乾燥機への送り量が50.6wet-kg/hと53.3wet-kg/sの場合に対して、押込み空気量はそれぞれ759kg/hと623kg/hである。エアヒーターへの押込み空気量を絞り、乾燥機へ熱エネルギーの供給を増やした結果、混合体の送り量が増えているにも拘らず、燃料体の生成速度は増加し、その含水率は減少している。これは、乾燥特性が改善されたことを示す。一方、押込み空気量の減少により、押込み空気のエアヒーター出口温度(Ti-13)が上昇したが、ボイラー流量(=水蒸気の発生量)はほぼ同じとなっている。従って、更に押込み空気量を絞ることにより、乾燥機における混合体の乾燥性能の改善が期待される。しかし、本システムでは、押込み空気のエアヒーター出口での温度(Ti-13)の上限は340℃と設定されている。このため、システムの安全性の確保の観点より、これ以上押込み空気を絞ることはでき

表4 エアヒーターへの空気量が乾燥特性およびボイラー流量に及ぼす影響

エアヒーター 押込み空気量	混合体 投入速度	混合体 送り量	燃料体 生成速度	燃料体 含水率	水分 蒸発量	ボイラー 流量	Ti-11	Ti-12	Ti-13
kg/h	Hz	wet-kg/h	wet-kg/h	%	kg/h	ℓ/h	℃		
759	12	50.6	23.3	18.3	27.3	32.4	735	468	280
623	14	53.3	24.4	17.8	28.9	31.6	742	479	309

表5 熱配分計算の基礎データ

	温度	密度	質量流量	比熱	熱量
	°C	kg/m <sup>3</sup>	kg/h	kg/(kg·K)	MJ/h
Ti-3	815	0.317	655.6	1.266	676.6
Ti-11	742	0.339	678.8	1.200	604.4
Ti-12	479	0.458	788.6	1.173	443.1
Ti-16	309	0.593	499.4	1.015	156.7
Ti-2	273	0.631	925.5	1.106	279.4
Ti-13	269	0.636	928.9	1.100	274.9
Ti-14	135	0.844	1142.6	1.040	160.4
Ti-15	132	0.850	1146.8	1.035	156.7

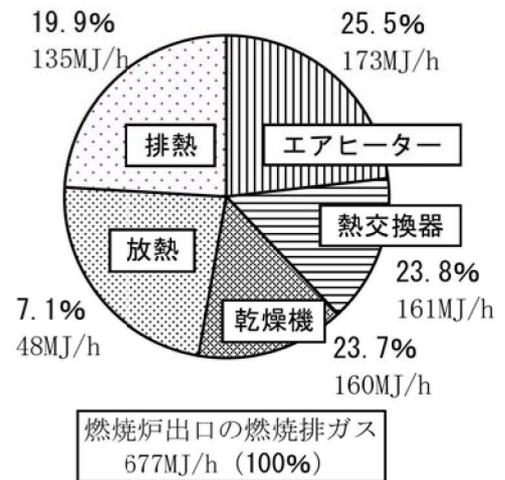


図5 燃焼排ガスの熱エネルギーの配分

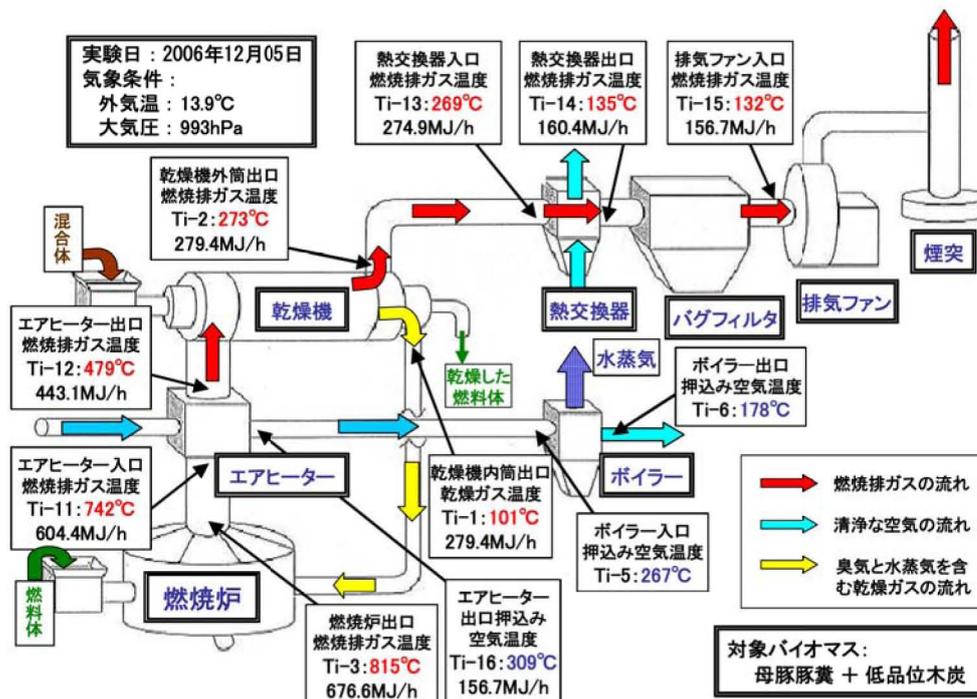


図4 パイロットプラントの熱配分データ

ない。しかし、ボイラー流量自体は変化がなかったため、燃焼排ガスの熱エネルギーは全体として、より効果的に利用されたと考えられる。また、本実験で発生させた水蒸気量32ℓ/hは、今回用いられた木材乾燥炉(炉容量約4.5m<sup>3</sup>)に対しては十分であった。

### 3.5 燃焼排ガスの熱配分

長時間運転における各測定箇所の温度の測定結

果に基づき、燃焼排ガスの熱量計算を行なった。表5は、各測定箇所の温度・密度・質量流量・比熱・熱量の一覧表である。図4は、システム全体に関する測定温度等のデータを示す。測定温度の記号番号、温度および熱量が図中に記され、また、燃焼炉出口から煙突までの各位置で燃焼排ガスが持っている熱量も記載されている。

図5は、燃焼炉出口で燃焼排ガスが持つ熱量677MJ/hを100%として、エアヒーター・乾燥機・熱

交換器での熱量の授受および炉壁管壁等からの放熱量、煙突からの排熱量を円グラフとして示す。放熱・排熱を除いた燃焼排ガスの熱利用は、73%である。また、乾燥機における熱の利用は、システム内部での利用である。従って、エアヒーターおよび熱交換器から取り出せる熱エネルギーのみが、システム外で利用可能なエネルギーとなり、この合計は燃焼炉出口の燃焼排ガスが持つエネルギーの約50%である。熱効率を上昇させるためには、エアヒーターおよび熱交換器の熱効率を向上させる必要がある。また、混合体から燃料体を生成する速度を増加し、燃焼炉での燃料体の消費量をできるだけ賄えるように、乾燥機での効率的な乾燥方法の工夫が更に必要である。

#### 4. まとめ

パイロットプラントの改修を行い、効率的なバイオマス燃焼を目指す実験を行った。その結果、得られた主な成果は以下である。

- (1) 長期間運転および短時間運転を行い、母豚豚糞と低品位木炭を混合したバイオマス燃料に対する燃焼特性を明らかにした。その結果、エアヒーターの増設等の改修は、燃焼効率を向上させる点できわめて効果的であり、短時間運転②では自立燃焼をほぼ達成できた。
- (2) しかし、乾燥機による燃料体の生成速度と燃焼炉における燃料体の消費速度とのマッチングは達成されていない。持続運転の確立に向けて、乾燥機による混合体の乾燥性能を向上させ、燃料体の生成速度を増加させる必要がある。

- (3) 燃焼炉出口における燃焼排ガスが有する熱エネルギーの各機器類への配分を明らかにした。この結果、エアヒーターや熱交換器での熱交換効率の向上や乾燥機での効果的熱利用への改善が求められる

#### 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る。

#### 参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 菊地, 平野, 森田, 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, 宮崎大学工学部紀要, 38, pp. 257-264, 2009.
- (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.