

# 旋回流燃焼器を用いたバイオマス粉体の燃焼

## Combustion of Pulverized Biomass Using a Cyclone Combustor

上島 光浩<sup>1)</sup> , 井上 徹<sup>2)</sup>

Mitsuhiro Uejima<sup>1)</sup>, Tooru Inoue<sup>2)</sup>

Abstract: As means for a stable premixed combustion, there is a so-called cyclone combustor, which consists of a cylindrical chamber and fuel nozzles installed tangentially on the side wall. In this combustor an extremely stable flame can be obtained in the swirl flow, formed along the inner wall of the combustor. In general, it is difficult for the clean combustion to occur in biomass combustion. In the present study, experiments on the biomass combustion by the cyclone combustor were carried out, and comparing fuel gas jet flames. Pulverized wood was used for biomass fuels. The effect of the fuel on the flame behavior and flame temperature were examined. It was shown that the temperature profile and flame photographs of the biomass flames are almost the same as those of the gas flames.

Key Words: Combustion, Cyclone combustor, Pulverized biomass, Gas fuel, Flame temperature

### 1. まえがき

火炎を安定化する手段の一つとして、円筒状燃焼器の側壁に接線方向に取り付けたノズルから燃料を噴出させる旋回流燃焼器が考えられる。例えば、小沼ら[1]はこの燃焼器がもつ優れた火炎安定化性能を実用燃焼器に応用することを目的として、その燃焼特性および火炎安定化機構を明らかにし、さらに NO<sub>x</sub> 排出特性について調べている[2]。また、著者はこの燃焼器を用いてガス燃料の燃焼特性を調べており、高負荷状態で低 NO<sub>x</sub> 燃焼が実現できることを確認している[3]。

本研究においては、廃棄物処理法の改善および CO<sub>2</sub> 排出削減に向けて、旋回流燃焼器を適応することを検討する[4]。住宅廃材や間伐材等の木質バイオマスは難燃性であり化石燃料を利用して焼却されているが、この木材を乾燥・粉末化して燃料化できれば、化石燃料の消費を削減できる。

本報告では、木質廃棄物バイオマスを粉体燃料として利用する実用的な旋回流燃焼器を開発するために、最適な燃焼条件を見出すことを試みた。最初に、平均粒径 25 $\mu$ m のスギ微粉を用いて安定供給できる装置の開発を行った。次に、小型の旋回流燃焼器を用いてプロパンガス/空気予混合火炎と粉体の燃焼特性について比較検討した。さらに、企業と共同で試作した大型の旋回流燃焼器を用いて火炎安定性に関する実験を行った。

### 2. 小型旋回流燃焼器を用いた燃焼実験

#### 2.1 実験装置および方法

実験装置は、旋回流燃焼器および燃焼室で構成されて

いる。燃焼室は、内径 200mm、高さ 750mm、厚さ 5mm のガラス管である。図 1 に示す旋回流燃焼器は耐火レンガ製の円筒形で、くぼみ部は内径 100mm、高さ 65mm、入口径 30mm、出口径が 60mm であり、4 本のステンレス製ノズルが設置されている。この旋回流ノズルから噴射された混合気により、リング状の火炎を形成する。内径 5mm のノズル A からスギ粉体を混入させた空気、内径 2mm のノズル B・D から保炎のためにプロパン/空気予混合、内径 4mm のノズル C から空気をそれぞれ供給する。

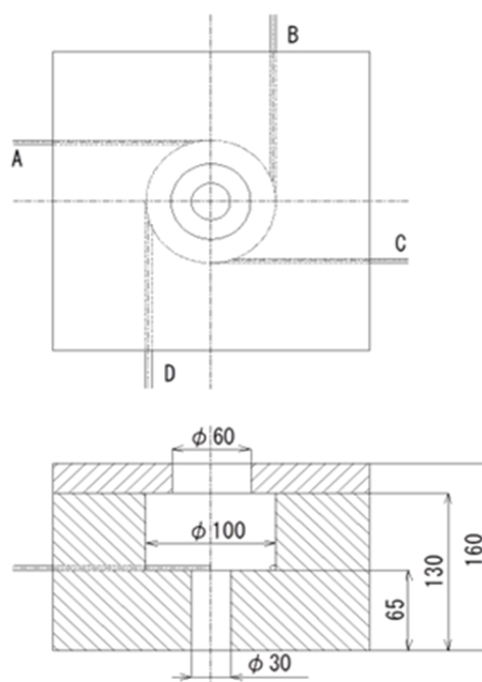


Fig.1 Cyclone combustor

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科  
生産システム工学コース

2) 東京都立産業技術高等専門学校 名誉教授

Table 1 Experimental conditions for woody and gas flames

flame	Q [L/min]	Q <sub>p</sub> [L/min]	Q <sub>a</sub> [L/min]	Q <sub>f</sub> [L/min]	M [g/min]	λ [-]	P [kW]	P <sub>f</sub> [kW]
Woody flame	157	76.1	63.5	3.56	23.4	0.82	12.6	6
					16.4	0.99	10.6	
					9.6	1.23	8.67	
gas flame	138	97.4	36.6	6.94	0	0.83	11.7	0
				5.78		1	9.71	
				4.62		1.25	7.76	

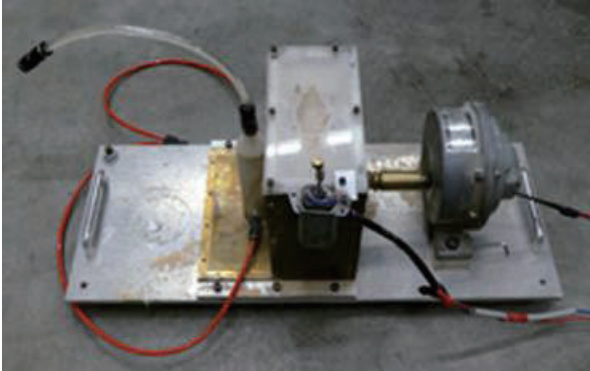


Fig.2 Experiments of supply for pulverized wood

一方、粉体燃料としては、高衝撃力を付加して機械的粉碎[5]を行った平均粒径 25 $\mu$ m のスギ粉体を用いた。図 2 に示すスクリーフ式粉体供給装置で粉体の供給を行ったが、その供給量はスクリーフ駆動用モータ電圧で制御した。火炎温度測定には、素線径 0.3mm の Pt-Pt/Rh13% 熱電対を用いた。なお、校正曲線は放射損失の補正は行っていない。

## 2.2 実験結果および考察

ホワイトペレットをミル型粉碎機で作製した粉体と比べ、今回用いたスギ粉体は 3~5 倍の供給量が得られた。両粉体を顕微鏡で観察したところ、ホワイトペレットの粒子形状が繊維質特有の片状であるのに対し、スギの粒子形状は球状になっていることがわかった。この形状の違いは粉碎方法の違いによって生じたものであるが、球状の粉体はブリッジを形成しにくく流動性が向上したために供給量が増大したものと推察される。以上の実験結果は、粒子が球状の木質粉体は供給量が増加するため、燃焼器の高出力化に適していることを示唆している。

空気流量一定で粉体供給量を変えることにより、空気比を変化させて温度分布を測定した。表 1 に粉体およびガス火炎の実験条件を示す。Q, Q<sub>p</sub>, Q<sub>a</sub>, Q<sub>f</sub>, M, λ, P, P<sub>f</sub>はそれぞれ全空気流量、ノズル B・D の空気流量、ノズル C の空気流量、プロパン流量、粉体供給量、空気比、全出力、パイロット火炎の出力である。

図 3 から図 6 に両火炎の写真と燃焼器出口中心からの噴流軸方向距離 H に対する温度分布を示す。なお、図 4 と図 6 中の φ は粉体火炎の総括当量比、ガス火炎の当量比を示している。図 3 の粉体火炎形状を見ると、粉体供給量 M が増加すると火炎長が長くなる傾向を示しており、図 5 のガス火炎と同様な傾向を示していることがわ



(a) λ=1.23 (b) λ=0.99 (c) λ=0.82

Fig.3 Flame photographs of pulverized wood

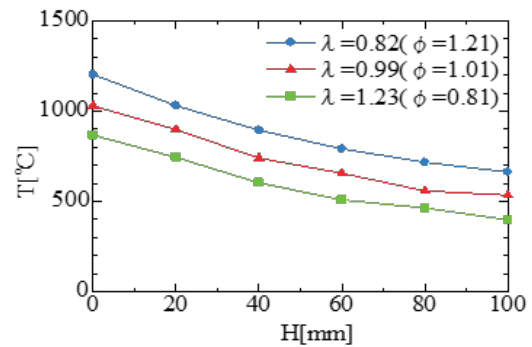


Fig.4 Flame temperature profiles pulverized wood



(a) λ=1.25 (b) λ=1.00 (c) λ=0.83

Fig.5 Flame photographs of propane gas

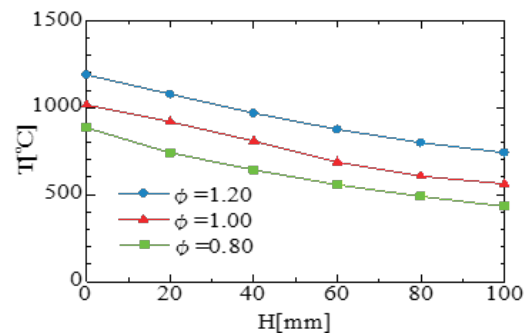


Fig.6 Flame temperature profiles propane gas

かる。これは、平均粒径 $25\mu\text{m}$ という微細な粉体を用いたために、粉体燃料が空気と十分に混合しガス火炎に近づいたと考えられる。一方、図4と図6を見ると、粉体火炎とガス火炎の温度分布はほとんど違いがないことがわかる。以上の実験事実から、両火炎の構造が類似していることが推察される。

は下段で燃え残った燃料と2次空気が燃焼したために温度上昇が生じたためと推察される。また、パイロットガス火炎の温度分布は、下段では当量比が1に近いため他の粉体火炎よりも温度が高くなり、上段では2次空気による希釈と熱損失により温度低下が生じていると考えられる。

### 3. 大型旋回流燃焼器を用いた燃焼実験

#### 3.1 実験装置および方法

図7、図8に大型旋回流燃焼器の外観および概略を示す。燃焼器は全高950mm、外径540mmであり、内部には内径200mm、深さ230mmのくぼみが二段あり、内径100mmの流路で連結されている。燃焼器出口径は75mmであり、側壁の2カ所に観察窓（内径50mm）が設置されている。1段目のくぼみ底部（断面A-A）に設置された燃料ノズル（内径27mm）から粉体およびプロパンガス/空気予混合気、別のノズル（内径27mm）から空気を供給した。

実験は総空気流量  $Q = 252\text{L/min}$  一定で、粉体供給量  $M = 15 \sim 33.7\text{g/min}$  を変化させた。粉体燃料の助燃剤として、プロパンガスを流量  $Q_f = 6.12\text{L/min}$  一定で供給した。実験条件を表2に示す。ガス温度測定には前節同様の熱電対を用い、空気比  $\lambda$  を変化させて温度分布を測定した。表2より、最大出力  $P$  は約20kWに達していることがわかる。

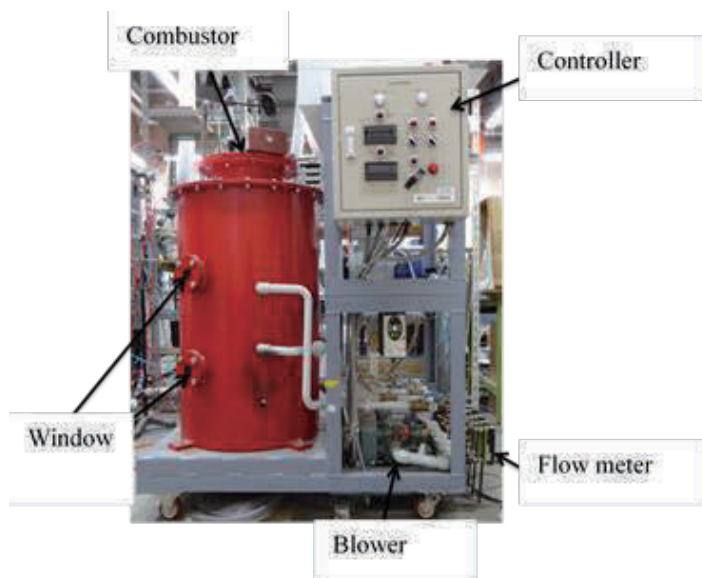


Fig.7 Experimental apparatus

#### 3.2 実験結果および考察

パイロット火炎として、プロパン/空気予混合火炎を用いて炉内を予熱した後に粉体を供給したところ、炉内周辺部を旋回する輝炎が観測された。さらに、燃焼器上段の空気ノズルから2次空気を供給すると煤の発生がなく安定燃焼が行われた。そこで、燃焼状況を調べるために燃焼器内におけるガス温度を測定した。燃焼器下段および上段の中央部における半径方向  $R$  のガス温度分布を図9、図10に示す。なお、比較のためパイロットガス火炎のデータも載せた。

図9に示した燃焼器下段の温度分布は、旋回火炎の影響を受けて燃焼器周辺部においても高温領域が現れている。一方、図10の燃焼器上段の温度分布は、燃焼器側壁の熱損失の影響を受けて周辺部が低下する山形を示している。また、両図の燃焼器断面中心部  $R=0$  において下段と上段を比較すると、約 $900^\circ\text{C}$ から約 $1000^\circ\text{C}$ に温度が上昇している。これは下段においては過濃状態であるために発熱反応が十分行われないのに対し、上段におい

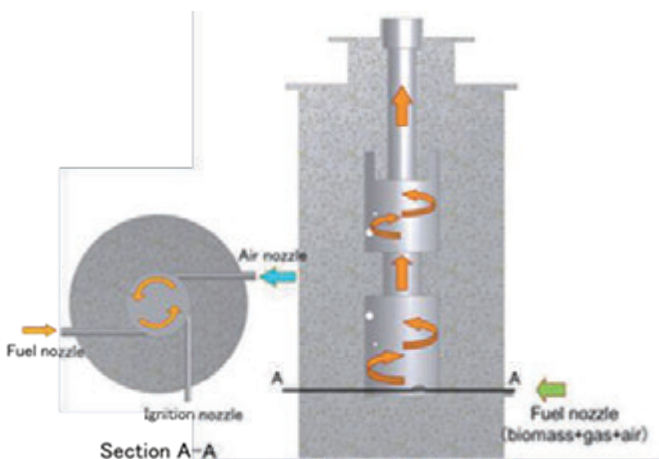


Fig.8 Schematic of cyclone combustor

Table 2 Experimental conditions for pulverized wood

Q [L/min]	Q <sub>f</sub> [L/min]	M [g/min]	$\lambda$ [-]	P [kW]	P <sub>f</sub> [kW]
252	6.12	33.7	0.84	19.7	10.3
		23.4	1	16.9	
		15	1.18	14.5	

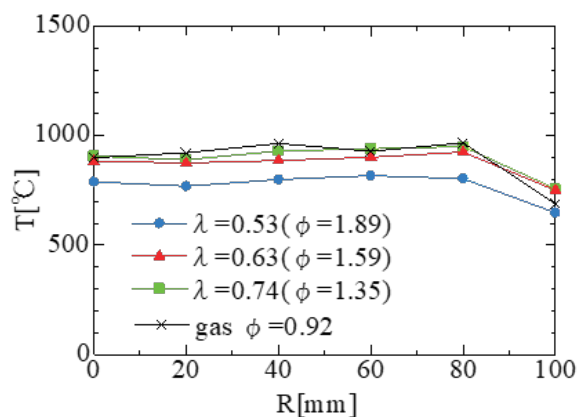


Fig.9 Flame temperature profiles in the lower stage of combustion chamber

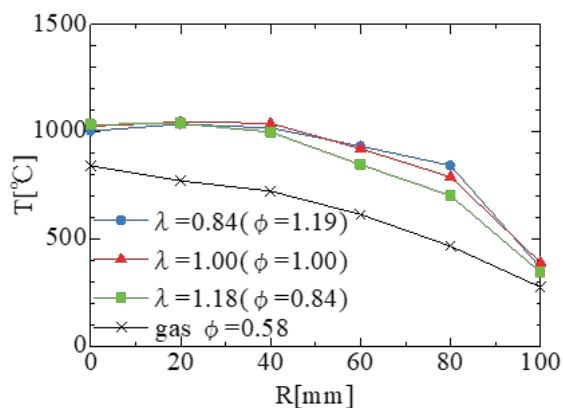


Fig.10 Flame temperature profiles in the upper stage of combustion chamber

#### 4. ま と め

小型および大型の旋回流燃焼器を用いてバイオマス燃料であるスギ粉体を燃焼させ、さらにプロパンガス燃料の燃焼特性と比較した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 粒子が球状の木質粉体は供給量が多く、燃焼器の高出力化に適している。

- (2) 小型燃焼器において、粒径約  $25 \mu\text{m}$  の微粉体火炎は、ガス火炎とほとんど同じ火炎挙動を示し、さらに両火炎の温度分布は類似している。
- (3) 大型燃焼器において、この微粉体を用いると最高温度約  $1000^\circ\text{C}$ 、最大出力約  $20\text{kW}$  での安定燃焼が可能である。

以上、バイオマスはこれまで難燃性燃料であるとみなされてきたが、本研究で提案する旋回流燃焼器に粉体化した木質バイオマスを燃料として採用した結果、安定燃焼が実現し、旋回流燃焼器の有効性を確認することができた。粉体供給量を増加させて旋回流燃焼器を高出力化することが今後の課題である。また、旋回流燃焼器の火炎安定性とクリーン燃焼の特徴を生かして、サトウキビ表皮やヤシ殻など、未だ燃料として利用されていない廃棄物バイオマスを粉体燃料として利用するなどの展開が期待される。

#### 謝 辞

大型の旋回流燃焼器は(株)DEMS の岡村大氏と共同で開発したものであり、今回の実験に採用した。また実験に使用したスギ粉体は、秋田県立大学の高橋武彦准教授に提供していただいた。ここに記し感謝の意を表す。

実験に協力した都立産業技術高専学生の大澤俊斗君、長嶋秀哉君に感謝する。

#### 文 献

- [1] 小沼・ほか4名，“旋回流燃焼器による希薄予混合燃焼”，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 61, No. 584 (1995), pp.318-323.
- [2] 長津・ほか3名，“旋回流燃焼器における  $\text{NO}_x$  生成”，第30回燃焼シンポジウム講演論文集(1992), pp.52-53.
- [3] 上島，“旋回流を利用した低  $\text{NO}_x$  燃焼”，第47回燃焼シンポジウム講演論文集(2009), pp.48-49.
- [4] 上島・井上，“旋回流燃焼器を用いたバイオマス粉体の燃焼”，日本機械学会 2019 年次大会講演論文集 (2019), No.19-1.
- [5] 高橋・ほか4名，“木質系バイオマス微粉碎効率向上のための歯車型リング媒体利用粉碎機の研究開発”，日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.788 号 (2012), pp.905-916.