

# 旋回流燃焼器を用いたバイオマス粉体の新燃焼法

## New Combustion Method 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 stable premixed combustion, we have presented the 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 system. In the present study, experiments on the biomass combustion by the cyclone combustor were carried out, and comparing those on fuel gas jet flames. Wood charcoal, bamboo charcoal and white-pellet were used for biomass fuels. The effect of the fuel on the NO<sub>x</sub> formation and flame temperature were examined. It was shown that the temperature profile and NO<sub>x</sub> formation of the biomass flames are almost the same as those of the gas flames.

Key Words: Combustion, Cyclone combustor, Pulverized biomass, Flame stability

### 1. まえがき

地球環境問題への燃焼技術分野における取り組みは、燃焼効率の向上、低 NO<sub>x</sub> 化、燃料多様化と進み、さらにエネルギーシステム全体から見た技術革新が今日求められている。また、低炭素社会の実現に向けて、カーボンニュートラルな燃料として間伐材や害虫被害を受けた木材等のバイオマス燃料を活用した燃焼技術の構築が期待されている。これらの木質バイオマス燃料は、化石燃料と異なって燃料性状の変動が顕著であるとともに多量の水分を含む低発熱量であり、安定した高効率燃焼が困難である。そのために、燃焼機器の設計にあたっては新たな技術が必要となっている。

木質バイオマス燃料の利用形態として、木材をチップ状、あるいはペレットに加工したものを燃焼炉で直接燃焼させる方法が挙げられる。これらの従来から用いられている木質バイオマスの燃焼処理法のほとんどは、難燃性を補うために助燃剤に燃料油や天然ガス等を必要とし、化石燃料への依存および燃料代によるコスト高を招いている。さらに当然のことながら、これらの燃焼システムは助燃剤の排出物として CO<sub>2</sub> を発生させることになり、環境保護の観点からも問題となる。また、ペレット単体の利用法として、ペレットストーブが最近注目されているが、火炎温度が低く高効率燃焼は達成できず小規模な民生用の温熱利用に留まっている。

一方、木質バイオマスを流動床や電気炉により加熱して燃料ガスを発生させるガス化プロセスでは、システム全体が複雑かつ高価となることや、バイオマス材に特有

のタール発生が実用化に向けての高いハードルとなっている。微粉炭焚き火力発電システムにおける木質バイオマスの利用に石炭と混焼させる方法がとられているが、混焼率は 3% [1] 以下であり、木質バイオマスを有効に専焼させることは困難である。

燃焼器からの NO<sub>x</sub> 排出を低減する有力な方法の一つとして、燃料希薄な予混合燃焼を行うことがある。しかしながら、現在工業的に広く用いられている拡散火炎に比べて予混合火炎は安定性が悪く、高負荷で安定な予混合燃焼を得ることは困難である。火炎を安定化する手段の一つに、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 [2] を明らかにし、さらに NO<sub>x</sub> 排出特性 [3] について調べている。

本研究においては、ガス燃料と同じ燃焼挙動を示す程度に木質バイオマスを粉砕して粉体燃料化する。この粉体燃料を旋回流燃焼器の高速旋回空気流中で着火させ、バイオマスの安定な燃焼を持続させることにより、高発熱・高効率な燃焼炉の実用化を目指す。すなわち、廃棄物処理法の改善および CO<sub>2</sub> 排出削減に向けて、旋回流燃焼器の適応性について検討する。

本論文では、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、小型の旋回流燃焼器を用いてプロパンおよびメタン/空気予混合火炎を対象に可燃限界、NO<sub>x</sub> 排出量と諸因子との関係を調べ、木質バイオマス粉体の燃焼特性について検討した。

次に、実用化に向けて大型の旋回流燃焼器を試作し、比較的粒径の大きな木質バイオマス粉体を用いて火炎安定性に関する実験を行った。

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) 同 電子情報工学コース

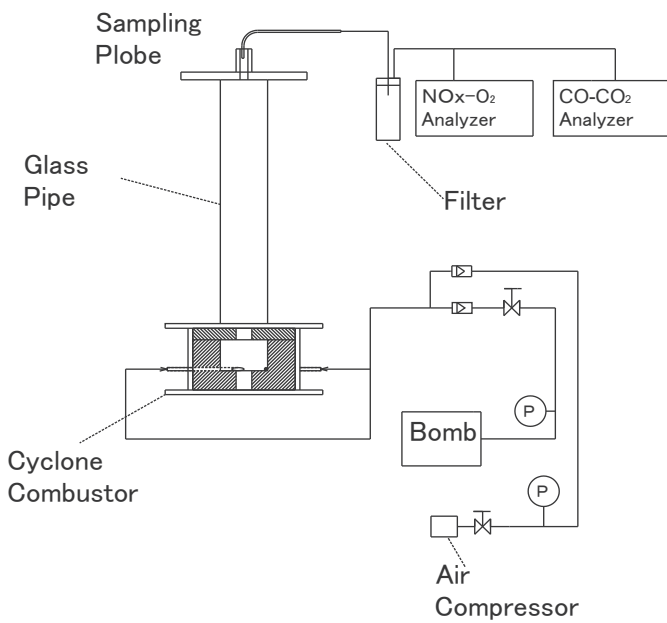


Fig.1 Experimental apparatus

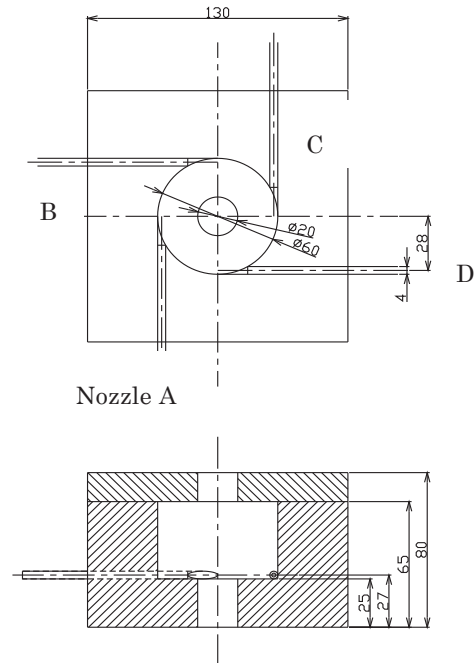


Fig.2 Cyclone combustor

## 2. 小型旋回流燃焼器を用いたガス燃料の燃焼実験

### 2.1 実験装置および方法

図1に示した実験装置は、旋回流燃焼器および燃焼室で構成されている[4]. 燃焼室は、内径100mm、高さ750mm、厚さ2mmの耐熱ガラス管である。図2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60mm、高さ40mm、出口径が20mmであり、内径2mmのステンレス製ノズルが4本設置されている。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。燃焼器底部には直径20mm、深さ25mmの穴があり、この部分にセラミックス管を設置することにより、燃焼器中央部に輻射体としての効果を有する突起を作ることができる。今回は突起なしで実験を行った。

実験は予混合火炎を対象に、ノズル本数  $n$  を2本と4本に切り替えることで、予混合ガス速度に変化を与えて排気特性を調べた。燃料としては、プロパンおよびメタンを使用した。一方、空気はコンプレッサーより供給され、空気流量を変えることで燃焼負荷を変化させた。

排気ガス中の化学種 ( $\text{NO}_x$ , CO) 濃度の測定は、燃焼室排気口中心部にガスサンプリングプローブを挿入して行った。排気口断面でガス組成が均一であることを確認している。サンプリングプローブには内径3mmのステンレス管を用い、周りを外径12mmの黄銅管の温水ジャケットで覆っている。また、サンプリングラインは、内径4mmのテフロン管でその周囲からバンドヒーターで加熱した。以上の処置により、サンプリングした燃焼ガスが管内で凝縮して、水溶性の  $\text{NO}_2$  が凝縮水に溶解されることを防いでいる。 $\text{NO}_x$  濃度は化学発光法、CO濃度は非分散形赤外線吸光法により測定した。使用したガス分析装置は、 $\text{NO}_x$  濃度に対して NOA-7000 (島津製作所製)、CO濃度に対して CGT-7000 (島津製作所製) である。

### 2.2 実験結果および検討

ガス燃料を用いて、空気流量  $Q_a$  を30L/minから50L/minまで変えることで燃焼負荷を変化させ燃焼器の火炎安定性を調べた。燃料ノズルはA, Cの2本を用いた。図3および図4にCO排出濃度によって求めた可燃限界を示す。縦軸は当量比  $\phi$  で、過濃限界のCO排出濃度は200ppmであり、これより燃料を濃くしてゆくと、CO排出濃度が急に上昇する。一方、希薄限界ではCOの発生がなくこれより希薄にすると火炎は不安定になり、ついには火炎が消失する。両図を比較すると、メタンよりプロパンの希薄限界の方が若干小さな値を示すことがわかる。また燃料に依らず、空気流量すなわち予混合ガス速度が増加すると希薄限界は減少する傾向を示している。最大噴出速度は約67m/sであり、このように高速にしても当量比0.32~0.36での希薄燃焼が可能であり、この旋回流燃焼器が希薄予混合燃焼に対して優れた性能をもっていることがわかる。当量比一定でガス速度を上げることはその速度に比例して燃料の供給量を増加させることを意味するが、噴出速度上昇による乱れの促進がそのような燃焼負荷の増大を可能にしているものと考えられる。一方、燃料がプロパンのとき最大燃焼負荷は24MW/m<sup>3</sup>であり、工業用ボイラー(約5MW/m<sup>3</sup>) [5]よりも高負荷な燃焼を実現している。

次に、 $\text{NO}_x$  排出量に及ぼす燃料流量、空気流量およびノズル本数  $n$  の影響について調べた。その結果を図5、図6に示す。ここで  $\text{EINO}_x$  は  $\text{NO}_x$  排出指数 (燃料1kgの燃焼によって排出される  $\text{NO}_x$  のグラム数) である。 $\phi$  の低下と共に  $\text{NO}_x$  排出量が減少する一般的な噴流予混合火炎の傾向を示している。 $\phi$  が0.8付近におけるメタンの  $\text{EINO}_x$  のピーク値は、プロパンのそれよりも低いことがわかる。一方、空気流量およびノズル本数を変えることにより予混合ガス流の乱れを変化させても、 $\text{NO}_x$  排出量への影響はほとんど現れていないことがわかる。

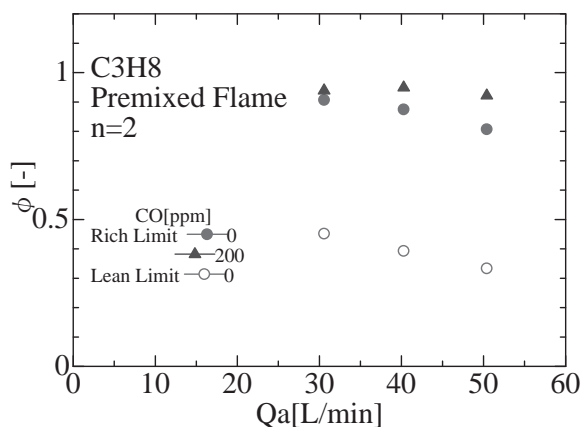


Fig.3 Flammability limits of propane

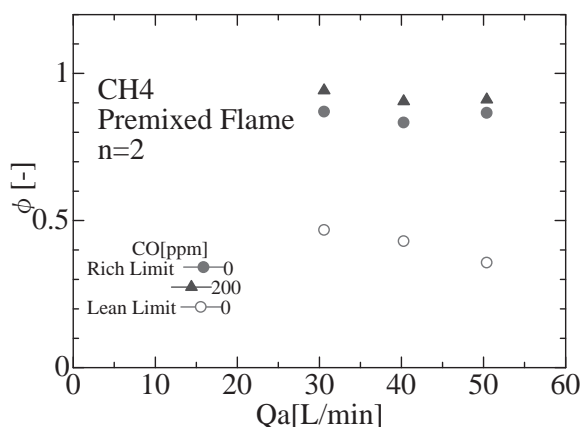


Fig.4 Flammability limits of methane

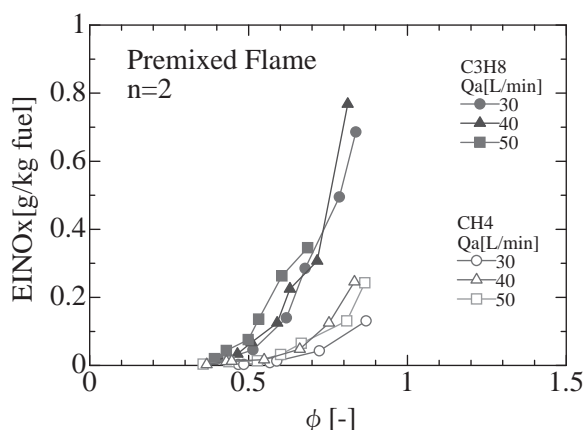


Fig.5 Effect of  $\phi$  on EINO<sub>x</sub> for fuels (n=2)

図7にメタン/窒素混合燃料のNO<sub>x</sub>排出特性を示す。横軸は窒素と燃料の体積混合比で、縦軸は窒素混合燃料のEINO<sub>x</sub>と燃料単体のEINO<sub>x</sub>の比である。窒素混合比が約2でEINO<sub>x</sub>の値はほぼ半減しており、消炎する直前の混合比7ではEINO<sub>x</sub>の値は単体燃料の20%にまで減少していることがわかる。窒素混合による火炎温度の低下が、このようなNO<sub>x</sub>低減をもたらしたと推察される。

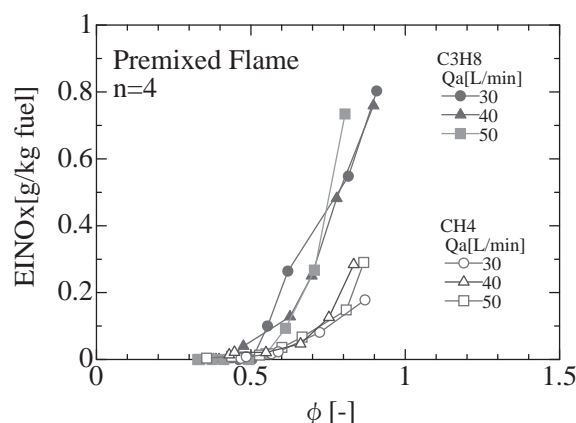


Fig.6 Effect of  $\phi$  on EINO<sub>x</sub> for fuels (n=4)

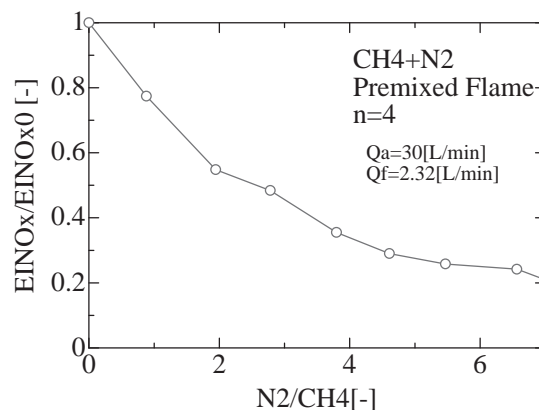


Fig.7 Effect of nitrogen on EINO<sub>x</sub>

### 3. 小型旋回流燃焼器を用いた粉体燃料の燃焼実験

#### 3.1 実験装置および方法

粉体燃料実験に用いた装置はガス燃料の場合と同様であり、図2に示すように4本のステンレス製ノズルを設置した[6]。内径2mmのノズルA・Cから、保炎のためにプロパン/空気予混合気を、内径4mmのノズルDから粉体を混入させた空気を、内径2mmのノズルBから空気のみをそれぞれ供給する。粉体燃料としては平均粒径7 $\mu$ mの木炭炭、平均粒径10 $\mu$ mの竹炭を用いた。図8に木炭炭の顕微鏡写真を示すが、間伐材を電気炉で400 $^{\circ}$ C一定で炭化した後に、ジェットミルで粉状に粉砕したもので、発熱量は6,680cal/kgである。一方、図9に竹炭の写真を示すが、竹割り箸を木炭炭同様に炭化した後にロータリミルで粉状にしたもので、発熱量は7,480cal/kgである。また、表1に両粉体の成分分析結果を示す。木炭炭および竹炭の燃料比(固定炭素/揮発分)を算出すると、3.9および4.1であり、この値は半瀝青炭(燃料比4~7%)と同程度である。

実験は、空気流量20L/min、粉体供給量2g/min一定で行った。なお、NO<sub>x</sub>濃度およびCO濃度はガス燃焼実験と同じ装置を用いて測定した。火炎温度測定には、素線径0.1mmのPt/Rh40%-Pt/Rh20%熱電対を用い、その出



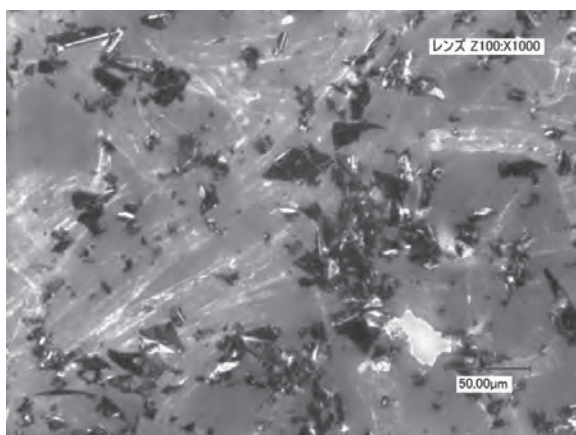


Fig.8 Wood charcoal

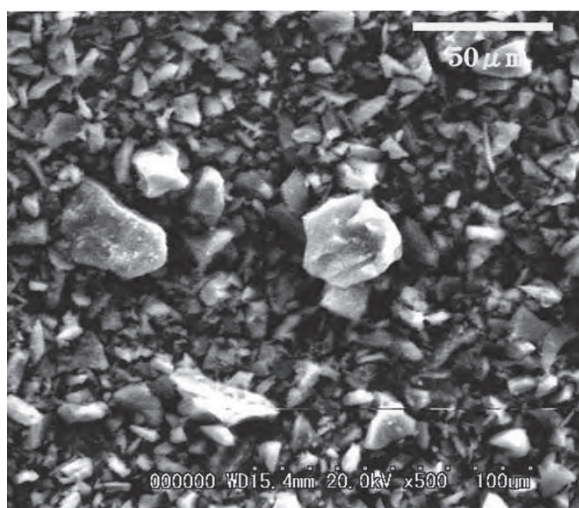


Fig.9 Bamboo charcoal

力はデータロガーによって記録した。

### 3.2 実験結果および検討

図 10 (a), (b) に木材炭および竹炭の粉体火炎写真を示す。粉体供給量は 5 g/min である。両火炎ともに平均粒径より大きな粒径の粉体が飛翔して燃焼する様子が見られるが、全体的な火炎形状はガス火炎と類似していることがわかる。

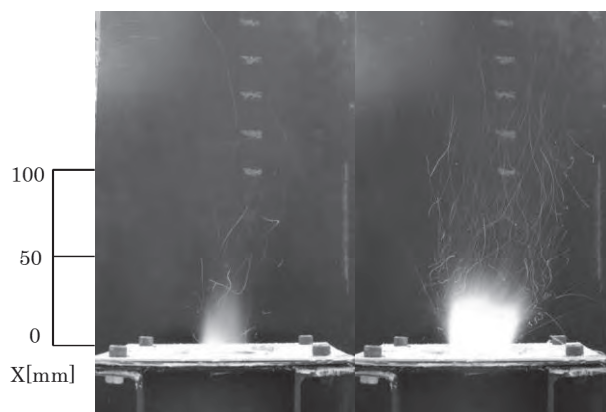
プロパンガスを用いたパイロット火炎が、バイオマス粉体火炎の排気ガス組成に及ぼす影響を調べた。図 11 は、ガス濃度を変化させて CO 濃度を測定した結果で、横軸  $\phi$  はパイロット火炎の当量比である。パイロット火炎単体の結果を見ると、燃料濃度の低下に伴って  $\phi=1.25$  付近の過濃側で CO 濃度が急に減少し、その後 CO 濃度が低い値を維持している。 $\phi=0.32$  より希薄側では火炎が不安定になり、さらに燃料濃度を薄くすると火炎が消失した。パイロット火炎単体の燃焼範囲は当量比  $\phi=0.32 \sim 1.25$  であるのに対し、木炭混焼火炎では当量比  $\phi=0.32 \sim 1.00$ 、特に竹炭混焼火炎では  $\phi=0 \sim 0.90$  と希薄側の燃焼範囲が広く、ガス燃料の供給を止めた場合においても安定な火炎が形成され、バイオマス粉体の自燃が確認できた。

図 12 に NOx 排出特性を示す。パイロット火炎単体の結果を見ると、 $\phi=1$  付近でピークを持つ NOx が、 $\phi$  の低下に伴って減少するという一般的な噴流予混合火炎の傾向を示している。一方、バイオマス粉体火炎もガス火炎と同じ傾向を示しているが、希薄側で NOx 排出量はゼロにはならず 10ppm 程度検出されている。この原因としては、表 1 に示した元素分析結果であるバイオマス成分由来の窒素の酸化が考えられる。ただし、この現象については不明な点があるので、今後さらに検討を要する。

旋回流燃焼器出口下流 5mm 断面における半径  $r$  方向の火炎温度分布を測定した。図 13 は、パイロット火炎の当量比  $\phi=0.50$  を一定とし、粉体混入時の火炎温度  $T_f$  を調べた結果である。両粉体火炎はガス火炎に比べて約 200°C 温度が高いことがわかる。これは、パイロット火炎が希薄であり理論混合状態の火炎温度に比べて火炎温度が低くなるのに対し、ガス燃料に粉体燃料を付加した場合には混合気全体の燃料濃度が濃くなり、理論混合状態に近づいたために火炎温度が上昇したものと考えられる。

Table 1 Biomass fuel properties

		Charcoal	Wood	Bamboo
Proximate analysis (Wt %)	Moisture		2.3	1.7
	Ash		4.0	2.3
	Volatile matter		19.2	18.8
	Fixed carbon		74.5	77.2
Ultimate analysis (Wt %)	C		86.3	87.0
	H		2.8	3.26
	O		6.46	6.86
	N		0.34	0.58
	S		0.05	0.03
	Ash		4.1	2.3



(a) Wood charcoal (b) Bamboo charcoal  
Fig.10 Charcoal flames

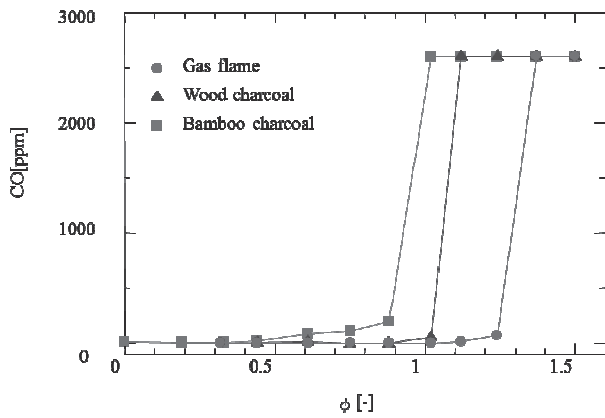


Fig.11 CO Concentration profiles

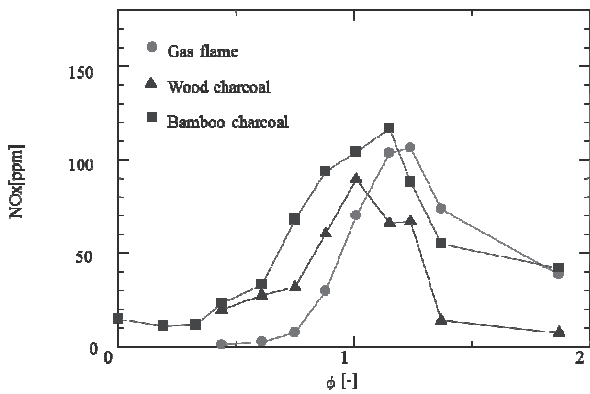


Fig.12 NOx Concentration profiles

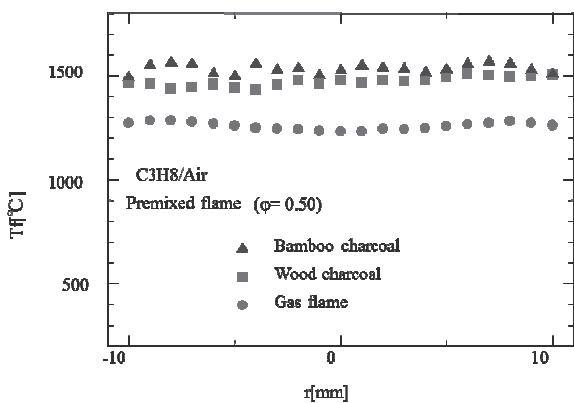


Fig.13 Flame temperature profiles of pulverized biomass

## 4. 大型旋回流燃焼器を用いた粉体燃料の燃焼実験

### 4.1 実験装置および方法

図 14, 図 15 に大型旋回流燃焼器の外観および概略を示す[7]. 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. 燃料としてはホワイトペレットを用い, 粉砕動力を極力少なくするために, 前章の炭化物に比較して大きな粒径 300~500  $\mu\text{m}$  の粉体に粉砕した. 粉体供給量  $M$  は 10 g/min である. 実験は総空気流量  $Q_a=60\text{L}/\text{min}$  一定で, 燃料ノズルからの流量  $Q_{ag}$  と空気ノズルからの流量  $Q_{aa}$  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  $Q_g=1\text{L}/\text{min}$  もしくは  $2\text{L}/\text{min}$  で供給した. 実験条件を表 2 に示す. ガス温度測定には, 素線径 0.3mm の Pt-Pt/Rh13% 熱電対を用いた.

### 4.2 実験結果および検討

プロパン/空気予混合火炎で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. 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 1 段目中央部における半径方向のガス温度分布を図 16 に示す. 燃料ノズルから助燃剤として過濃予混合気を粉体と共に供給した後に, 空気ノズルから 2 次空気を供給する場合には煤の発生がなく安定燃焼が行われ, 図 16 に示したようにガス温度が高くなることが確認できた.

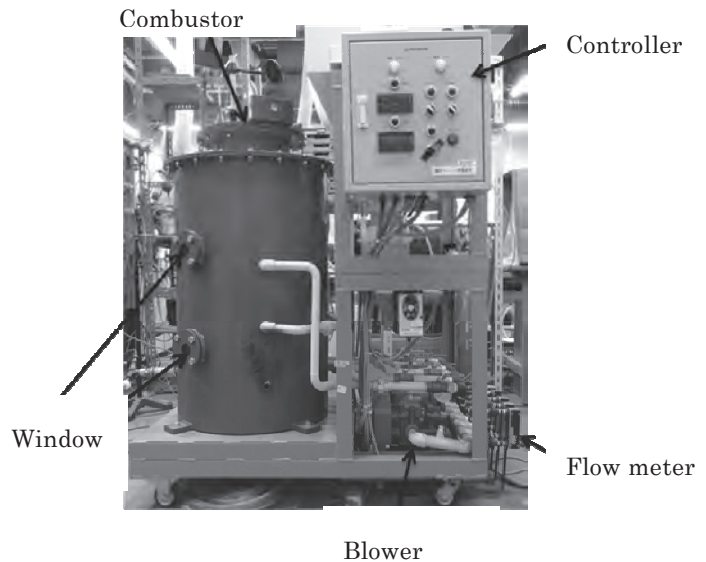


Fig.14 Experimental apparatus

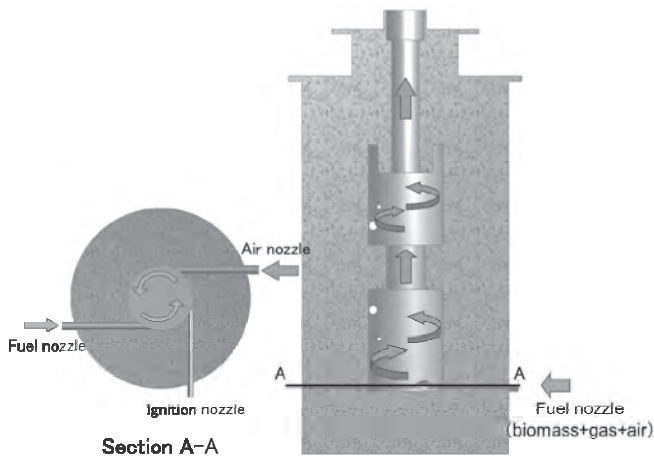


Fig.15 Cyclone combustor

Table 2 Experimental conditions of pulverized wood

Qa[L/min]		Qg[L/min]	$\phi$ g[-]	M[g/min]
Qaa	Qag			
30	30	2	1.59	10
		1	0.79	
20	40	2	1.19	
		1	0.60	
10	50	2	0.95	
		1	0.48	

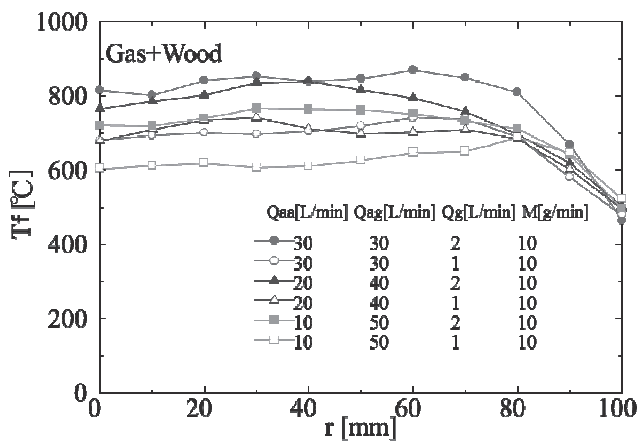


Fig.16 Flame temperature profiles of pulverized wood

## 5. ま と め

小型、大型の旋回流燃焼器を用いて、プロパンおよびメタン/空気予混合火炎を対象に諸因子と可燃限界、NO<sub>x</sub>排出量の関係を調べ、さらに木質バイオマス粉体の火炎安定性についても実験的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 旋回流燃焼器を用いると、種々のガス燃料に対してクリーンでしかも安定した希薄燃焼が可能である。
- (2) 本実験の条件範囲において、予混合ガス流の乱れの変化はNO<sub>x</sub>排出量にほとんど影響しない。
- (3) プロパンよりメタンの方がNO<sub>x</sub>排出量は少なく、またメタンに窒素を混合するとNO<sub>x</sub>排出量は著しく減少する。
- (4) 空気流中に添加混合した粒径約10 $\mu$ mの微粉体はガス燃料とほぼ同様の燃焼排気特性を示す。
- (5) 粒径300~500 $\mu$ mの木質粉体燃料においても、旋回流燃焼器を用いると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。ここに記し感謝の意を表す。また実験に協力した、当時東京都立産業技術高等専門学校品川キャンパス学生の横山大士、藤谷崇、猪俣郁弥、谷口俊哉、原祥太、渡来祐太、青山華永、村山敏生の諸君に感謝する。

## 文 献

- [1] 田村・ほか2名, 日本機械学会誌, 第54巻168号, pp.61-68, 2012.
- [2] 小沼・ほか4名, 日本機械学会論文集B編, 第61巻584号, pp.318-323, 1995.
- [3] 長津・ほか3名, 第30回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.52-53, 1992.
- [4] 上島, 第47回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.48-49, 2009.
- [5] 辻, 機械の研究, 第28巻5号, pp.670, 1976.
- [6] 上島・井上, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.508-509, 2011.
- [7] 上島・井上, 熱工学コンファレンス2016講演論文集, 2016.