マイクロフレイムを用いたウェットバイオガスの微小スケールでの燃焼安定性

Flame Stabilization on Microscopic Scale of Wet Biogas with Microflame

井田 民男*・渕 端 学*・水 野 諭*

Tamio IDA, Manabu FUCHIHATA and Satoru MIZUNO

(Received June 7, 2010)

Harvesting, transportation, energy conversion and the high-efficient utilization, cascade method and market formation besides become with the indispensable element in order to utilize the biomass resource. There are two type biogases; it is gasified gas from dried biomass by partially combustion and wet biogas from wet biomass by methane fermentation, especially from the livestock excrement resources. This paper discusses an experimental study for flame stabilization on microscopic scale with wet biogas (mainly $0.6\text{CH}_4+0.4\text{CO}_2$). In this study, the microflame with the wet biogas fuels are formed by the diffusion flame on the coppered straight pipes of inner diameter $0.02\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$. This study is obtained stability mapping on microscopic scale of formed microflame by wet biogas fuels. The flame stability limit conditions on microscopic scale of wet biogas is drawn with blow off and extinction flame double limit lines. It is suggested that minimum mixing spatial scale change by the each mixing ratio of the wet biogas.

Key Words: Microscopic Scale, Combustion Stabilization, Microflame, Wet Biogas

1. 緒言

バイオマス資源を活用するには、収穫から輸送、エネルギー変換とその高効率利用、さらにカスケード利用と各ステージでの市場成立が不可欠な要素となる。特に、エネルギー変換ステージにおいては、バイオマス資源をガス化し熱エネルギーとして活用する視点から見ると、炭化水素系の混合ガスとなるので、従来の単独ガス燃焼とは異なり、混合ガス燃焼での燃焼特性の把握が必要となる。さらに、ドライあるいはウェットバイオマスからのガス化において、そのガス化条件により、混合ガスの比率が異なることは周知であり、これらの燃焼過程での安定性の向上あるいは高効率化などの基礎研究が少ないらしいがある¹⁾³⁾。

本研究では、マイクロオーダーのバーナを開発し、その上に定常かつきわめて小さな火炎（マイクロフレイムと呼ぶ）を形成することに成功し、拡散火炎及び予混合火炎の微小スケールでの燃焼安定性について研究を推進している⁴⁾⁹⁾。特に、マイクロバーナ上に形成される火炎のバーナ出口での流体力学的な条件をパラメータにすることにより、上限条件あるいは下限条件での燃焼安定性を定量的に評価することが可能となった。さらに、拡散火炎での下限スケールでは、周囲空気との混合スケールがコロモグロフスケールに漸近することと、定常な燃焼反応を持続するための熱容量が限界に近づくため、安定な燃焼反応を実現す

るための知見を得ることができる^{10), 11)}。

本研究では、ウェットバイオガスの高度な燃焼技術の開発を鑑み、畜産汚泥資源からのメタン発酵技術から作られるウェットバイオガスに焦点を絞り、その微小スケールでのバイオガスの燃焼安定性について検討する。

2. 実験方法

実験は、微小スケールでの燃焼安定性について定量的な評価を得るための実験を行う。ここでは、畜産汚泥資源からのメタン発酵バイオガス（主に $0.6\text{CH}_4+0.4\text{CO}_2$ ）の燃焼安定性を得るために **Table 1** に示す実験条件で行った。マイクロフレイムは、内径 $0.02\text{mm} \sim 1.5\text{mm}$ の銅製ストレートパイプ上に拡散火炎により形成した。マイクロフレイムの観察は、定常に燃焼反応が維持できる状態を目視により確認し、静止撮影およびバーナ出口での流体力学的な条件をパラメータに行った。

Table 1 Mixing ratio with wet biogas

No.	A1	A2	A3	A4	A5
$\text{CH}_4(\text{vol}\%)$	60	70	80	90	100
$\text{CO}_2(\text{vol}\%)$	40	30	20	10	0

*近畿大学理工学部（〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1）

School of Science and Engineering, Kinki University (3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan)

Photo.1 Typical microflame formed on $\phi 0.1 \times 0.2\text{mm}$

Fig.1 Schematic of combustion stability region map

3. 実験結果と考察

3.1 マイクロフレームの基礎燃焼特性

マイクロフレームの基礎的な燃焼特性を示す。Photo.1 に $\phi 0.1 \times 0.2\text{ mm}$ のマイクロバーナ上に形成される $0.6\text{ CH}_4 + 0.4\text{ H}_2$ 燃料による出口での燃料流量が下限条件での拡散火炎の静止撮影結果を示す。火炎の高さは、青炎部の先端で 0.8 mm 、火炎幅は、 1.2 mm と下流方向に縦長の半楕円球の形状をしている。青炎部は、三日月上に観察される。

Fig.1 にバーナ径と出口での燃料噴出条件による燃焼安定性のイメージを示す。このイメージは、燃料種が決まるとその拡散過程、発熱量などが決まることにより、その微小スケールでの燃焼安定性が描けることを示している。特に、バーナ出口での燃料噴出条件が上限と下限値に挟まれた領域で定常火炎が形成されることが分かり、バーナサイズを小さくするに従い、その範囲が狭まりバーナサイズに対す

る下限値が求まることが分かる。このバーナサイズ以下では、定常な火炎が形成できない領域が存在することを示す。

3.2 ウェットバイオマスガスのマイクロバーナ上に形成される火炎形状

Photo.2 に Table1 に基づく燃料比率の異なる条件による火炎形状の変化を示す。写真下方に見られる白い四角がマイクロバーナの外形と位置を表している。火炎形成条件は、バーナ出口での下限燃料流量条件である。(a) は、 $\phi 1.5 \times 2.5\text{ mm}$ のバーナ上に形成された撮影結果、(b) $\phi 1.0 \times 1.7\text{ mm}$ のバーナ上に形成された撮影結果、(c) $\phi 0.4 \times 0.6\text{ mm}$ の撮影結果、(d) $\phi 0.2 \times 0.4\text{ mm}$ での撮影結果を示す。また、火炎形状の変化を定量的に考察するために、Fig.2 に (a) $\phi 1.5 \times 2.5\text{ mm}$ バーナサイズでの火炎高さの変化を示す。

(a)(b) は、ミリサイズバーナ上に形成される燃料比率が異なる火炎形状の変化を示す。バーナ出口での燃料流量は、 $\pm 5\%$ の範囲で同量の燃料供給量であるにも関わらず、火炎形状が大きく変化している Fig.2 に示す火炎高さについては、メタン燃料の比率が多くなるに従い、指数関数的に小さくなり、A1/A5 条件では約 3 倍の変化が見られる。火炎形状は、メタン燃料の比率が多いほど、青炎部面積は少なく三日月状の青炎領域が観察されるが、メタン燃料の比率が減るほど、馬蹄状の火炎形状へと変化している。さらに、メタン燃料の比率が減るほど、青炎部での自発光強度が弱くなる傾向にある。特に、青炎部の馬蹄形状先端での自発光が極端に弱くなり、筒状の発光領域が形成されることが分かる。

(c) マイクロバーナ上に形成される定常火炎では、A5 と A4 の実験条件でのみ定常な火炎が形成できる。火炎高さは、A4 : 0.705 mm 、A5 : 0.882 mm と少し変化するが、火炎形状はメタン燃料の比率が下がっているのも、青炎部が馬蹄状へと明確に変化していることが分かる。さらに、(d) では、A5 条件でのみ定常火炎が形成される。火炎高さは 0.44 mm と小さく、青炎部がきわめて薄い三日月状の火炎が形成される。

(a) ~ (d) の静止撮影結果を見ると、バーナからの青炎部までの浮き上がりのような領域の高さは、下限条件下ではほぼ一定であり、バーナ出口での噴出条件に寄らないことが分かる。

3.3 マイクロバーナによる燃焼安定性マップ

Fig.3 に Table1 の A1 ~ A5 の実験条件での異なるバーナサイズにより定常火炎が形成されるバーナ出口での上限と下限値を指標とする噴出条件による燃焼安定性マップを示す。図からバーナサイズと燃料混合比率の変化による安定性の変化と特徴を得ることができる。Fig.4 には、メタン混合比率に対する下限条件での極小バーナサイズの変化を示す。

まず、バーナサイズの影響は、燃料混合比率の変化に関

(a) Microflame on $\phi 1.5 \times 2.5\text{mm}$

(b) Microflame on $\phi 1.0 \times 1.7\text{mm}$

(c) Microflame on $\phi 0.4 \times 0.6\text{mm}$

(d) Microflame on $\phi 0.2 \times 0.4\text{mm}$

Photo.2 Change of flame shape under lowest limit condition for various mixing ratios

わらず、定常火炎が形成できるバーナサイズに対する極小値が存在し、その燃料流量はA1～A4条件ではほぼ同量であることが分かった。また、定常燃焼領域は、メタン燃料の比率が減るに従いその安定領域が小さくなっていることが分かる。下限流量値に関しても、バーナサイズが変化しても、定常火炎形成に必要な燃料流量はさほど変化しないことが分かる。これらの結果より、混合燃料ガス燃焼の定常火炎が形成できる下限値において、混合比率により最小混合空間スケールが変化していることを定量的に得ることができた。

4. 結果

マイクロフレームを用いて、ウェットバイオマスガスの

各種混合燃料ガスの燃焼安定を実験的に求め、次のようなことが分かった。

- 1) 混合燃料ガスの燃焼安定性マップを描き、バーナサイズに対する極小値を定量的に求めることができた。
- 2) 混合燃料ガスのメタン燃料比率が少なくなるに従い、定常燃焼領域が小さくなることが分かった。
- 3) 混合燃料ガスの混合比率により、最小混合空間スケールが変化し、その定量値を求めることができた。

参考文献

- 1) 横山伸也他；バイオマスハンドブック（日本エネルギー学会編）、(2002) 152-156 オーム社
- 2) 小宮山宏、迫田章義、松村幸彦；バイオマス・ニッポン、(2003)

Fig.2 Change of flame height on $\phi 1.5 \times 2.5\text{mm}$

Fig.3 Combustion stability map of microflame

Fig.4 Change of Minimum burner size based on lowest condition

77-81 日刊工業新聞社

- 3) 羽賀清典他；家畜排せつ物の処理・リサイクルとエネルギー利用、(2004) 26-31 NTS
- 4) 湯浅裕樹他；分子拡散に支配されるマイクロ・ジェットフレイムの着火・消炎機構の可視化、第40回燃焼シンポジウム講演論文集、(2002) 127-128
- 5) 中村祐二、齊藤孝三；マイクロフレイムに形成される熱と流れ場、ながれ、20 (2001) 74-82
- 6) H. BAN, S. Venkatesh, K. Saito; Convection - Diffusion Controlled Laminar Micro Flames, Transactions of the ASME, 116, (1995), 954-959
- 7) 井田民男、瀧端学、水谷幸夫；マイクロ・ジェットフレイムの基礎燃焼特性、第38回燃焼シンポジウム講演論文集、(2000) 281-282
- 8) 井田民男、大竹一友；マイクロフレイムツールとしての微視的火炎構造の燃焼特性、第34回燃焼シンポジウム講演論文集、(1996) 270-272
- 9) 井田民男、瀧端学；「きわめて小さな火炎」が造りだす微小領域での火炎現象、日本燃焼学会、45-134 (2003) 1-5
- 10) 大竹一友、藤原俊隆；燃焼工学、(1985) 69-139 コロナ社
- 11) 水谷幸夫；燃焼工学、(1989) 76-114 森北出版社