

低カロリーバイオマスガスの火炎挙動と燃焼特性に関する研究

芦田龍郎* 吉本隆光**

Research into Flame Behavior and Combustion Characteristics of Low calorie Biomass Gas

Tatsuro ASHIDA* Takamitsu YOSHIMOTO**

ABSTRACT

The gasification gas produced in gasification furnace and the bio-mass gas collected from sewerage processing are receiving attention as renewable energy. The bio-mass gas of which the release calorific value is about a tenth of methane calorific value is the gas that contains much inert gas (N_2 , CO_2). It is important that the bio-mass gas is utilized as one of renewable fuel. In this study we research into combustion characteristic and stability limits of the bio-mass gas diffusion flame.

Keywords: bio-mass gas, renewable energy, diffusion flame, low calorific value fuel

1. はじめに

近年、再生可能ガス等のバイオマスガス燃料が注目を集め、燃料としての実用化も報告⁽¹⁾されている。ガス炉から発生するガス化ガス・下水処理施設また木質系廃材から回収されるバイオマスガスは不活性ガス(窒素・二酸化炭素)を多く含んでいるバイオマスガスであるが、燃料としても有用であると考えられる。

本研究ではガス化炉から発生する発熱量が純粋なメタンの10分の1である低カロリーバイオマスガスを使用する。低カロリーバイオマスガスでは、多種のガス成分が混合されているため、安定条件を検証することが困難になっている。そのため火炎を安定に保つしくみはまだ不明な点も多く研究途中の段階である⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そこで、この低カロリーバイオマスガスを元に、模擬低カロリーガスを作成する。模擬低カロリーガス成分割合は、各種可燃性ガスまた不活性ガスを混合することによって自由に決定できる。製作した模擬低カロリーガスをノズルより噴出し拡散火炎を形成する。そして低カロリーバイオマスガス中の各種ガス成分がそれぞれどういった影響を火炎挙動・火炎安定・火炎温度に与えているかを検証する。

2. 実験装置及び実験方法

Fig.1 に本実験に用いた燃焼装置を示す。

ガス化炉から回収される低カロリーバイオマスガスの成分割合はメタン 2.48%、水素 12.13%、一酸化炭素 8.91%、二酸化炭素 12.92%、窒素 63.56%である。この数値を元に模擬ガスを作成する。

流量測定は流量調節弁付フロート流量計を用いる。

ノズルは内径が 0.34[mm]~1.21[mm]のものはステンレス管で、1.94~5.00[mm]のものは銅管を使用している。

温度測定には0.1[mm]のR型熱電対(Pt-PtRh13%)とピトー管移動装置を用いて火炎の高さ及び半径方向の各位置での火炎温度を測定する。

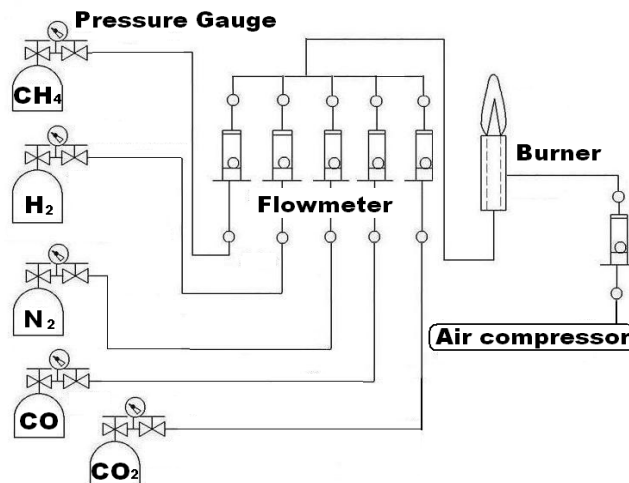


Fig.1 Flow chart

ガスサンプリングには、Fig.2 に示すサンプリングプローブとピトー管移動装置を使用する。

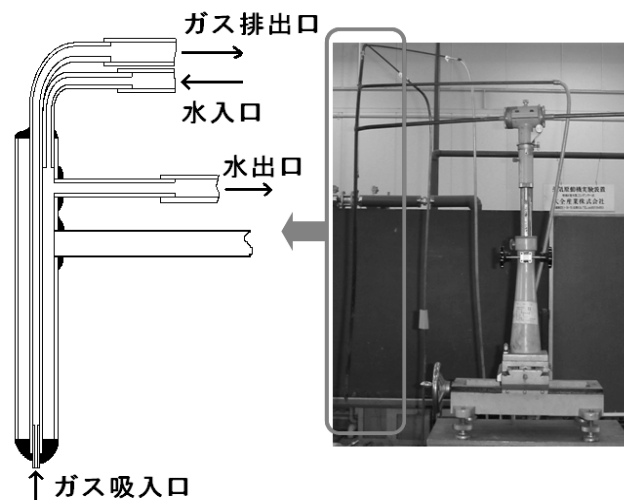


Fig.2 Flame temperature measurement equipment

* 専攻科 機械システム工学専攻

**機械工学科 教授

3. 実験結果

本研究ではガス化炉から回収される低カロリーバイオマスガスを対象とする。このガスの成分を元に模擬低カロリーガスを製作し実験を行った。各実験で測定した値、また火災の挙動を写真に撮ったものを示し、考察を述べる。

3.1 模擬低カロリーガスの火災安定 ガス化炉から回収される低カロリーバイオマスガスは、多くの種類のガス成分を含んでいる。多くの成分を含むバイオマスガスが安定して燃える条件を特定するために、それぞれのガス成分が燃焼に及ぼす影響を調べる。可燃性ガスである水素とメタンをベースとして、不活性ガスの窒素と二酸化炭素を混合させた模擬低カロリーガスを使用し、低カロリーバイオマスガスにおいて各成分が及ぼしている影響を検証していく。

ノズルを使用する燃焼には、ノズルの内径が火災の安定に大きく影響する。そこで各ノズル径における安定限界を調べる。燃料の噴出速度を上昇させていき火災が吹き飛んだ速度を安定限界とした。

3.1.1 水素による模擬低カロリーガスの火災安定変化

水素と窒素を混合した、模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.3 に成分割合別で、Fig.4 にノズル内径別で示す。

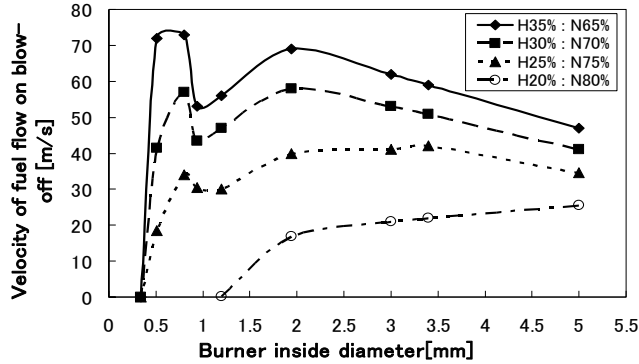


Fig.3 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Hydrogen-Nitrogen mixed)

水素割合が大きくなっていくにつれ、火災は安定する。水素割合 25%以上では、ノズル内径 1.94[mm]より大きくなると、安定性が下がる傾向にあることがわかる。また水素割合が25%よりも大きくなると0.80[mm]付近で安定性が向上し、35%以上になると0.51[mm]でも向上することが確認できる。ノズル内径 1[mm]付近で急激に数値が低下する原因としては、リム厚さ等の要因が考えられるが、今後詳しく調べていく。

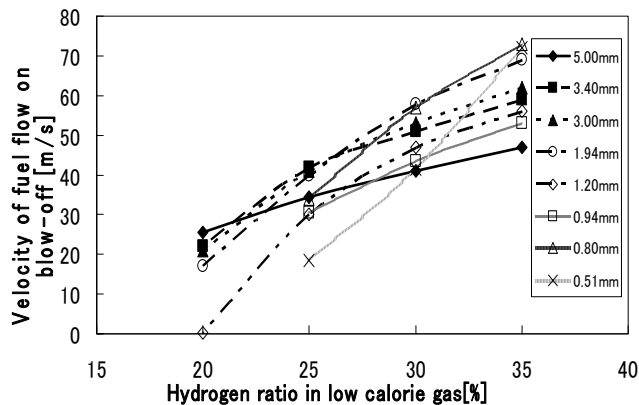


Fig.4 Velocity of fuel flow on blow-off for each Hydrogen rate in low calorie gas (Hydrogen-Nitrogen mixed)

ノズル内径 0.51[mm]において水素割合を増やすと、他のノズルよりも急激に安定性が向上することが確認できる。

水素に二酸化炭素を混合した、模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.5 に成分割合別で示す。Table 1 に、水素に混合する不活性ガスを窒素から二酸化炭素に変えたときの、安定性(吹き飛び速度割合)の低下を示す。水素-窒素火災の安定性を 100%とし、水素-二酸化炭素火災の安定性が何%低下しているかを示したものである。

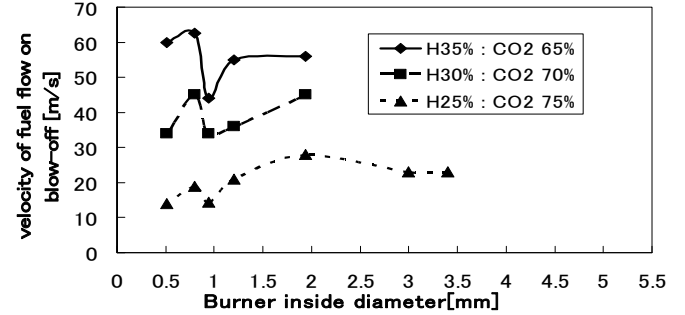


Fig.5 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Hydrogen-Carbon dioxide mixed)

Table 1 Impaired fraction of the flame stability with changing Nitrogen to Carbon dioxide in Hydrogen flame [%]

		Hydrogen rate in low calorie gas		
		35[%]	30[%]	25[%]
Burner inside diameter [mm]	1.94	18.8	22.4	30.0
	1.20	1.8	22.4	30.0
	0.94	17.1	21.8	52.5
	0.80	14.4	21.1	44.1
	0.51	16.7	18.1	24.3

水素-窒素の場合と変わらず、ノズル内径が 1.94[mm]より大きくなると安定性が下がり、0.80[mm]付近で安定性が向上している。水素に混合するガスを、窒素から二酸化炭素に変えると、全体的に火災安定性が 20~30%程度減少しており、最大で 50%低下している点も確認できる。定性的には、模擬低カロリーガス中の不活性ガス割合が増えるにつれて、二酸化炭素混合の方が安定性が低下している。ノズル内径を小さくしていても、二酸化炭素が火災の安定性を低下させる割合が大きくなったり、小さくなったりすることはなかった。

3.1.2 メタンによる模擬低カロリーガスの火災安定変化

メタンに窒素を混合した、模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.6 に成分割合別で、Fig.7 にノズル内径別で示す。

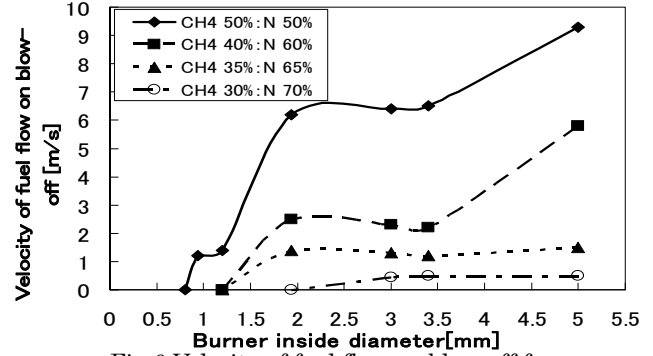


Fig.6 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Methane-Nitrogen mixed)

メタンは水素の場合とは違い、ノズル内径が大きくなるにつれ燃焼性が向上していることがわかる。これは岩本ら⁽⁶⁾によって調べられているが、メタンガスを大流量で噴出させ燃焼すると、ノズル上部で浮き上がり火炎を形成する現象に起因しているのだと考えられる。火炎が大きく浮き上がることにより、ノズル径による影響が小さくなり水素とは違った傾向が見られたと考えられる。メタン割合が25%以下では着火しなかった。ノズル内径が2.00[mm]以下になると急激に安定性が低下し消炎にいたった。

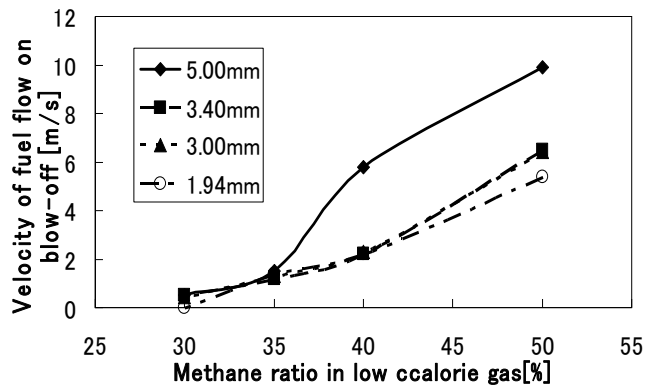


Fig.7 Velocity of fuel flow on blow-off for each Methane rate in low calorie gas (Methane-Nitrogen mixed)

ノズル内径が5.00[mm]の時、他のノズルとは違い、メタン割合40%以上になると、安定性が大幅に上昇していることが確認できる。

メタンに二酸化炭素を混合した、模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.8 に成分割合別で示す。Table 2 に、メタンと窒素を混合した火炎の安定性を100%としたときの、メタンと二酸化炭素を混合した火炎の安定性を示す。

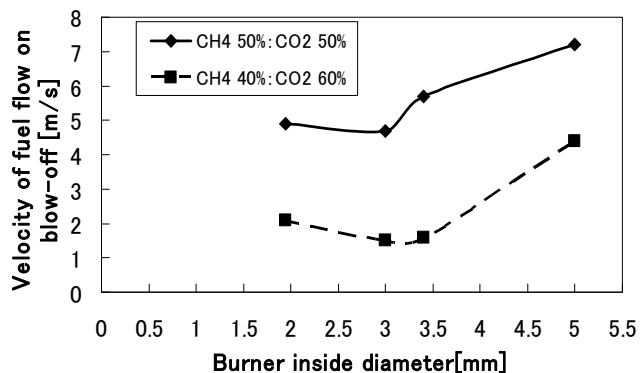


Fig.8 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Methane-Carbon dioxide mixed)

Table 2 Impaired fraction of the flame stability with changing Nitrogen to Carbon dioxide in Methane flame [%]

		Methane rate in low calorie gas	
		50[%]	40[%]
Burner inside diameter [[mm]]	5.00	22.6	24.1
	3.40	12.3	27.3
	3.00	26.6	34.8
	1.94	21.0	16.0

メタン-窒素のときとはほぼ同じ傾向を示している。メタン割合30%以下のときは着火しなかった。メタンに混合するガスを窒素から二酸化炭素に変えることによって火炎吹き飛び時の燃料噴出速度が20~40%程度低下していることがわかる。さらに、模擬低カロリーガス中の不活性ガス割合が増えるにつれて、二酸化炭素混合の方が1.94[mm]以外では安定性が低下している。

3. 1. 2 水素とメタンの混合による模擬低カロリーガスの火炎安定変化

水素-メタン-窒素の三種を混合した模擬低カロリーガスを燃焼させた時の燃焼結果を Fig.9 に成分割合別で示す。

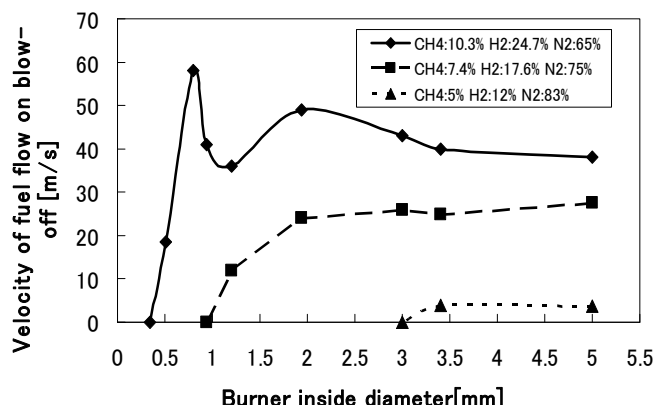


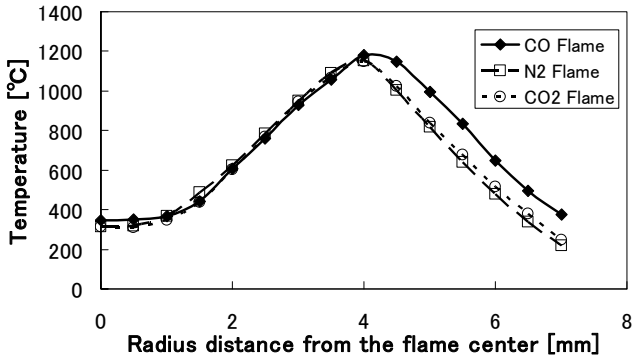
Fig.9 Velocity of fuel flow on blow-off for inside diameter of each burner (Hydrogen-Methane-Nitrogen mixed)

模擬低カロリーガス中の可燃性ガス割合は、17% (H₂12%:CH₄5%)・25% (H₂17.6%:CH₄7.4%)・35% (H₂24.7%:CH₄10.3%)の三種を使用した。可燃性ガスが、25%の時は水素-窒素で水素割合が20%の時とほぼ同じ傾向を示した。35%の時は水素-窒素で水素割合が25%の時とほぼ同じ傾向を示した。可燃性ガスの割合が多くなると、メタンが含まれていると水素単体に比べ大幅に安定性が低下することがわかる。

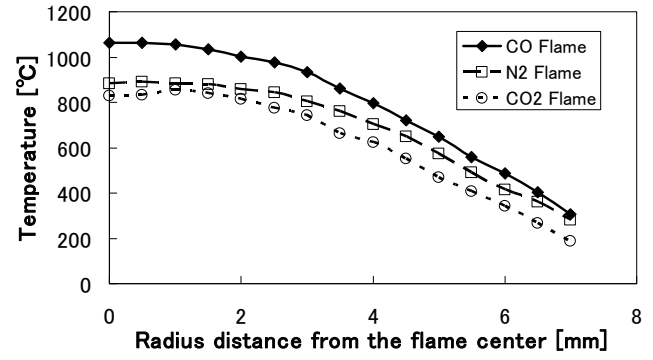
3. 2 一酸化炭素の影響

3. 2. 1 火炎温度測定による燃焼状態の比較

低カロリーバイオマスガスには、約10%の一酸化炭素が含まれている。その一酸化炭素が火炎にどう作用するかを調べた。3種類のガスを用意し温度測定を行った。1種目は一酸化炭素を含む模擬ガスで、各成分割合はCH₄7.4% H₂17.6% N₂55.8% CO₂11.3% CO7.9%である、図中ではCO Flameと示す。2種目はCO Flameのガスから一酸化炭素を取り除き、その割合を窒素割合に上乗せしたもので、各成分割合はCH₄7.4% H₂17.6% N₂63.7% CO₂11.3%である、図中ではN₂ Flameと示す。3種目はCO Flameのガスから一酸化炭素を取り除き、その割合を二酸化炭素割合に上乗せしたもので、各成分割合はCH₄7.4% H₂17.6% N₂55.8% CO₂19.2%である、図中ではCO₂ Flameと示す。3種とも可燃性ガスの割合は一定である。低位発熱量は、一酸化炭素を含むものが5.55[MJ/m³]で、含まないものが4.55[MJ/m³]である。この3つの測定結果を比較することでバイオマスガス中の一酸化炭素の影響を検証する。Fig.10(a)(b)(c)(d)(e)に、それぞれ火炎高さ5[mm]、10[mm]、15[mm]、20[mm]、25[mm]におけるCO Flame, N₂ Flame, CO₂ Flameの火炎温度分布を示す。

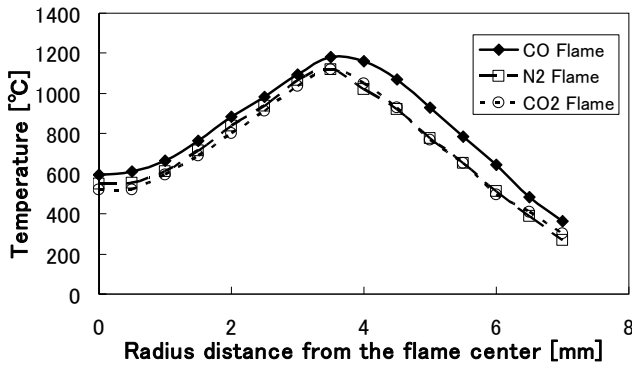


(a) 5[mm]



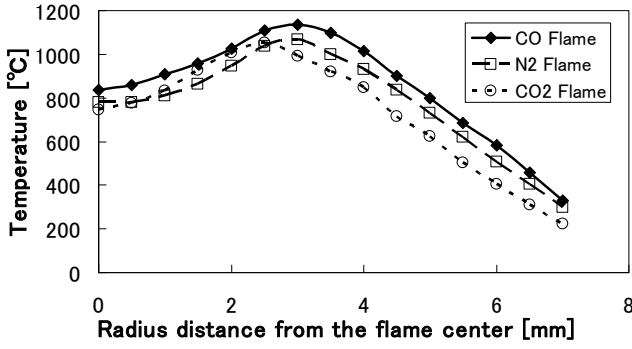
(e) 25[mm]

Fig.10 Temperature profiles of low calorie biomass gas flame(Exhaust velocity : 0.467[m/s]
Burner inside diameter : 5.00[mm])

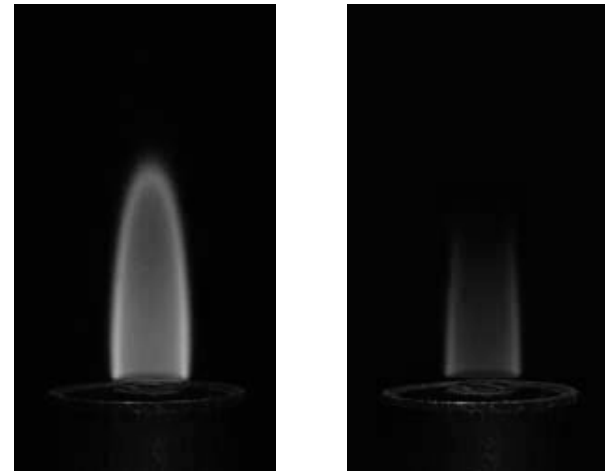


(b) 10[mm]

火炎高さ 5[mm]の地点では、火炎が一酸化炭素を含むことによって火炎面が 0.5[mm]程度外側に移動した。また他のガスと比べると 30°C程度であるが最高火炎温度が高くなっている。また火炎高さ 25[mm]では、温度分布の傾向は類似しているが火炎温度に差があり、CO Flame の最高火炎温度は 1064°Cに対し、N2 Flame は 890°C、CO2 Flame は 856°Cと一酸化炭素を含むことによって 200°C程度の差がでた。温度差が生じたのは一酸化炭素が熱量をもっているためだと考えられる。火炎写真として Fig.11(a)に CO Flame を、Fig.11 (b)に N2 Flame を示す。

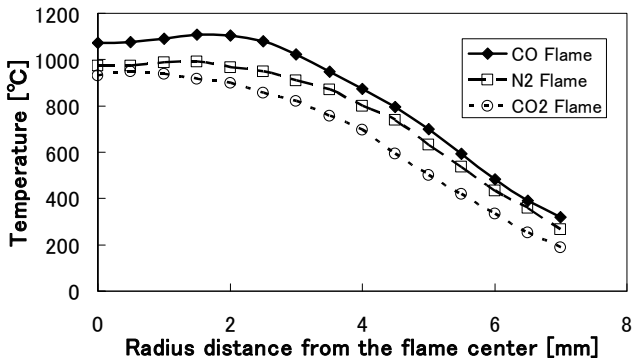


(c) 15[mm]



(a) CO Flame (b) N2 Flame

Fig.11 Pictures of each flame



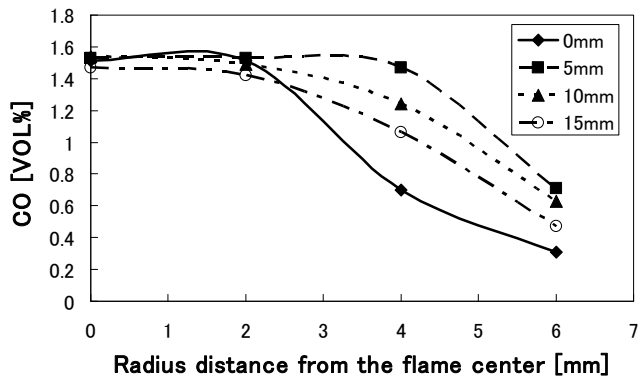
(d) 20[mm]

2つの写真を比べると、明らかに CO Flame は火炎の輝度が高いことがわかる。さらに、N2 Flame は火炎下流部において輝度が極端に下がり、見えなくなっている。CO Flame は火炎基部と上部の温度差が 116°Cであったのに対し、N2 Flame は 263°Cであった。この温度差が火炎下流部における火炎輝度を下げる要因になったのではないかと考えられる。これについては今後検討していく必要がある。

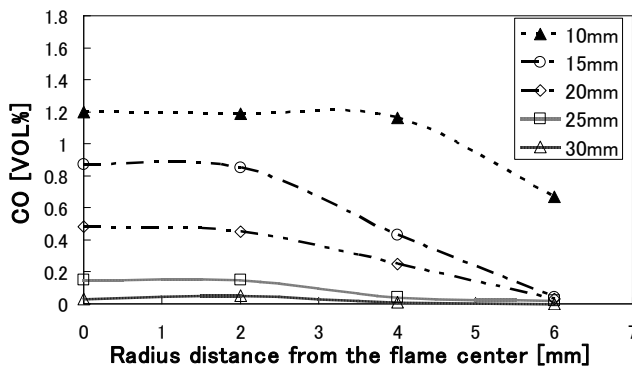
3. 2. 2 ガスサンプリングによる一酸化炭素の燃焼観察

バイオマスガスに含まれる一酸化炭素は、空気中に微量でも存在すると危険な物質である。そこでガスサンプリングによってバイオマスガス中の一酸化炭素が燃焼後に燃えきっているかを確認した。 Fig.12(a)に燃焼前の一酸化炭素量、

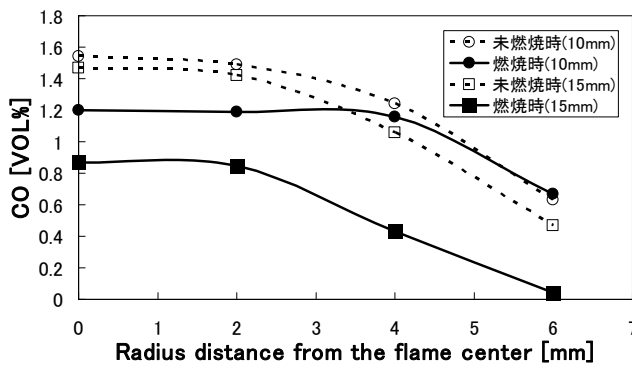
Fig.12(b)に燃焼後の一酸化炭素量、Fig.12(c)に比較したものを示す。使用したバイオマスガスの成分割合は $H_2:11.0\%$ $CH_4:11.3\%$ $N_2:57.8\%$ $CO_2:11.8\%$ $CO:8.1\%$ である。ノズルは内径5[mm]のものを使用した。噴出速度は0.467[m/s]である。



(a) Unburnt gas



(b) Exhaust gas



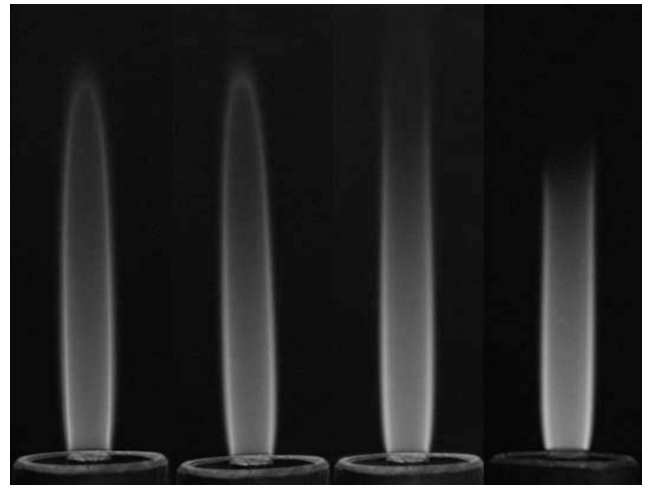
(c) Comparison

Fig.12 Carbon monoxide ratio in low calorie biomass gas flame

未燃焼時は存在した一酸化炭素が燃焼によって減少している。さらに、火炎下流部では一酸化炭素は確認できなくなるまで減少した。この結果より一酸化炭素を含むバイオマスガスは、燃焼すれば安全性を得られる事が確認できた。

3. 3. 不活性ガスの影響 3. 1で示したようにバイオマスガス中の不活性ガス(窒素・二酸化炭素)は可燃性ガスと同様、火炎に大きな影響を与えることがわかっている。そこで、バイオマスガス中の不活性ガスの影響を詳しく調べるために、直接写真・温度測定を用いて検証を行う。Fig.13に模

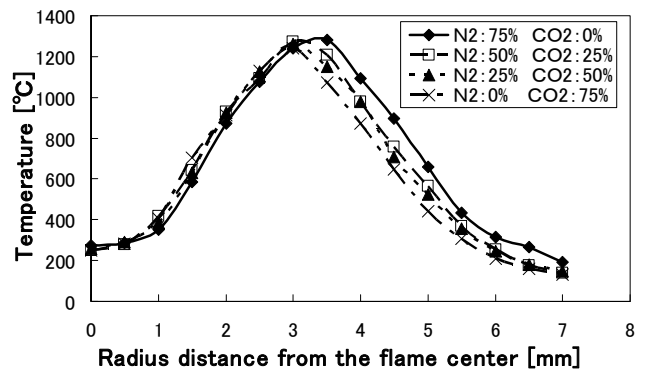
擬低カロリーガス中の窒素また二酸化炭素割合を変化させていったときの火炎挙動を示す。



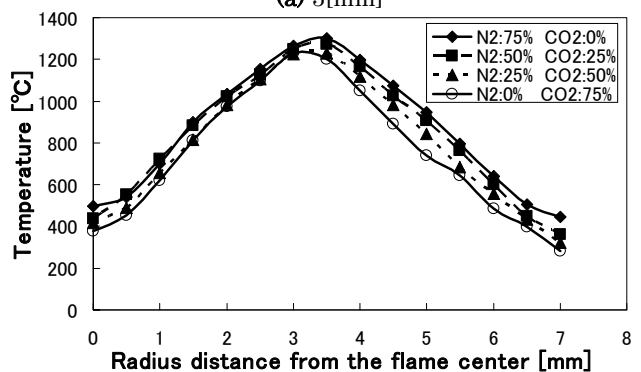
N_2 75% 50% 25% 0%
 CO_2 0% 25% 50% 75%

Fig.13 Flame behavior of bio-mass gas ($H_2:15\%$ $CH_4:10\%$ $CO:0\%$)
 Burner inside diameter:3.40[mm]
 Exhaust velocity:2.20[m/s]

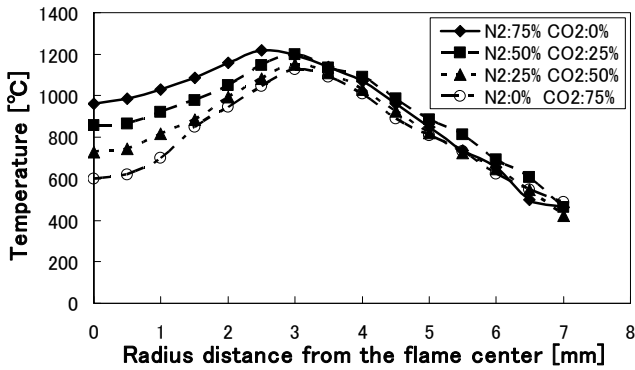
模擬低カロリーガス中の二酸化炭素割合が増えるにつれて、火炎上流部での火炎輝度が下がっていることが確認できる。次に、この4つの火炎について火炎温度測定を用いて比較する。ノズル先端から5[mm]・20[mm]・40[mm]・50[mm]の高さの点において測定を行った結果を Fig.14(a)(b)(c)(d)に示す。ノズル内径は、3.40[mm]を使用した。噴出速度は2.20[m/s]である。窒素・二酸化炭素以外のガスの割合は、 $H_2:15\%$ $CH_4:10\%$ $CO:0\%$ で固定している。



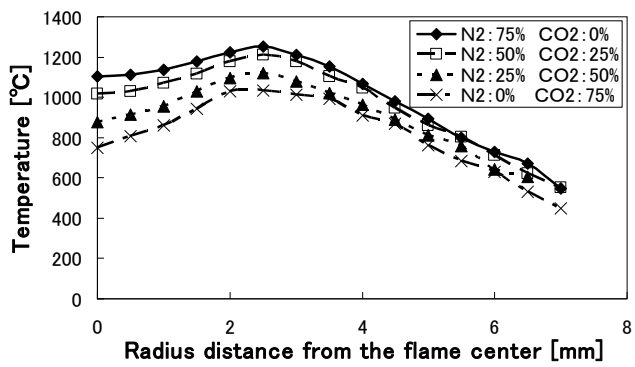
(a) 5[mm]



(b) 20[mm]



(c) 40[mm]



(d) 50[mm]

Fig.14 Profiles of flame temperature on each point

各結果において最高火炎温度を比較する。火炎高さ 5[mm]の時は、窒素 75%・二酸化炭素 0%の火炎と窒素 0%・二酸化炭素 75%の火炎の最高火炎温度が 42°C 違い。火炎高さ 20[mm]の場合は、71°C の差があり。火炎高さ 40[mm]の場合は、91°C の差があり。火炎高さ 50[mm]の地点では、222°C の差が確認できた。火炎下流部にいくにつれて、温度差が大きくなっていくという結果が得られた。Fig.13 において二酸化炭素割合が大きくなるにつれて火炎下流部の輝度が下がっていったのはこのためだと考えられる。また同じ不活性ガスである窒素と二酸化炭素だが、模擬低カロリーガス中の二酸化炭素は火炎温度を減少させる効果があることがわかった。

4. まとめ

- (1) 模擬低カロリーガスにおいて、ガス成分割合を変えることにより火炎の安定性の変化が確認できる。
- (2) 水素-窒素混合ガスでは、水素割合が多くなるにつれて、ノズル内径 1.00[mm]以下のマイクロフレームで火炎の安定性が急激に向上した。また 0.51[mm]では、水素割合を増やしていくと他のノズルに比べて著しく安定性が増す。
水素-二酸化炭素混合ガスは、傾向として水素-窒素の場合とあまり違いは無い。しかし、全体的に安定性が 20~30%程度減少しており、最大で 50%低下する。不活性ガス割合が大きくなるにつれ、水素と窒素との安定性の違いは顕著に現れてくる。
- (3) メタン-窒素混合ガスでは、ノズル内径を大きくするにつれ安定性が向上する。また、メタン割合 25%以下では着火しない。ノズル内径が 5.00[mm]の時、他のノズ

ルとは違い、メタン割合 40%以上になると、安定性が大幅に上昇する。

メタン-二酸化炭素混合ガスは、メタン-窒素に比べ安定性が 20~40%程度低下していることがわかる。メタン割合が 30%以下の時は着火しない。

- (4) 水素-メタン-窒素混合ガスでは、可燃性ガス割合が 25%の時、水素-窒素で水素割合が 20%の時とほぼ同じ傾向を示した。35%の時は水素-窒素で水素割合が 25%の時とほぼ同じ傾向を示した。母議定カロリーガス中の可燃性ガスの割合が多くても、メタンが含まれていると水素単体に比べ大幅に安定性が低下する。
- (5) バイオマスガスに含まれる一酸化炭素は、バイオマスガス火炎の火炎温度を上昇させ、可燃性を高めていると言える。さらに燃料の化学反応領域を火炎半径方向外側に移動させる効果がある。
バイオマスガス中の一酸化炭素は燃焼によって、完全に反応する。
- (6) バイオマスガス中の不活性ガスである窒素・二酸化炭素は、同じ不活性ガスであるがバイオマスガス火炎に違った影響を及ぼすことがわかった。二酸化炭素が大量に含まれるバイオマスガスは窒素を大量に含むものより、火炎温度が減少し火炎下流部での輝度が極端に下がることが確認できた。つまりバイオマスガス中の二酸化炭素には窒素に比べ火炎温度を下げ、火炎輝度を下げる効果がある。また、火炎安定性も 20~50%低下させる。

参考文献

- (1) 久米：「バイオガスの最新動向と課題」工業加熱，第 45 巻 第 6 号，pp. 9-16, 2007
- (2) 吉本，影山，中嶋，谷川，芦田：「低カロリーバイオマスガスの燃焼特性」，高温学会誌，第 36 巻，第 1 号，pp. 13-17, 2010.
- (3) T. Yoshimoto, Y. Shoji, T. Kageyama, and T. Takagi : Stability Limits Judged by Visualized Behaviors of Hydrogen/Methane Diffusion and Premixed Flames at High Speed, The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 21C-1, 2009
- (4) T. Yoshimoto, H. Kitamura, H. Shiosima, Y. Yasumoto, and T. Takagi : Stability Limits and Squeezing Behaviors of Hydrogen/Methane Diffusion Flames at High Speed, 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, No. 32762, July, 2007
- (5) T. Ashida, K. Ideguchi, R. Tanigawa, R. Takashima, T. Yoshimoto, and R. Samejima: Flame Behavior and stability limit of low BIO-MASS GAS Diffusion Flame, The 8th Meeting on Society of Solid Waste Management Experts in Asia and Pacific Islands, pp. 144-147, 2011
- (6) 岩本：「噴流拡散火炎の安定限界と挙動に関する研究」，神戸高専紀要，第 40 号，pp1-6, 2009