

■原著論文／ORIGINAL PAPER ■

# 急速混合型管状火炎燃焼の燃焼ガス特性

## Burned Gas Properties of the Rapidly Mixed Type Tubular Flame Combustion

下栗 大右・久保 力・石塚 悟\*

SHIMOKURI, Daisuke, KUBO, Chikara, and ISHIZUKA, Satoru\*

広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1  
Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan

2005年5月17日受付；2005年7月15日受理／Received 17 May, 2005; Accepted 15 July, 2005

**Abstract :** Burned gas properties of the rapidly mixed type combustion in a tubular flame burner have been experimentally investigated. Results show that the flammable range for the rapidly mixed type combustion is almost the same as that for premixed type combustion except that the rich limit is slightly narrowed, the burned gas compositions and temperature at the burner exit are also almost the same as those of the premixed type combustion, while the NOx emission are 10-15 % less than that of premixed type combustion for lean and the stoichiometric mixtures. These results demonstrate the potentialities of the rapidly mixed type combustion in a tubular flame burner, which is free from flame flash-back accident.

**Key Words :** Rapidly Mixed Type Combustion, Tubular Flame, NOx Emission, Exhaust Gas, Gas Analysis, Burned Gas Temperature

### 1. 緒言

可燃性混合気をスリットからガラス管内に接線方向に吹き出すと、回転伸張流中に管状火炎が形成される(図1 [1])。この火炎は、円筒座標系の火炎素として、基礎燃焼学の立場から研究されてきたが[1-4]、温度分布の対称性から断熱性が高く熱的に安定な上に、Rayleigh Criterion より空気力学的にも流れの回転運動に対して安定な火炎であるため、実用燃焼器に供する火炎として大きな潜在性を秘めている。これを受け、可燃性混合気を管の一端から吹き出す実用型の管状火炎バーナが試作され、その結果、均一で大きな面積の層流火炎が極めて安定に形成されること、希薄燃焼が容易に実現されること、断熱火炎温度に近い燃焼ガスが得られること、などが明らかにされた(図2 [5])。しかし、管状火炎は、あくまで予混合気を前提としているため、逆火の危険性があり、工業用バーナとして実用化するには大きな障害がある。

近年、この逆火の危険性を回避しつつ、優れた管状火炎の特性を得る方法として、燃料と酸化剤を別々に吹き出し、バーナ内で急速に混合させて管状火炎を得る“急速混合型管状火炎燃焼”が提案されている(図3 [6])。

これまでに、この急速混合型でも管状の火炎が得られることが確認されているが、あくまで外観上に限られ、実用上問題となる燃焼ガスの組成や NOx 値については不明である。そこで、本研究では、内径 100 mm (4 インチ) の管状火炎バーナを用い、急速混合型の燃焼でも予混合型の管状火炎燃焼と同等の燃焼ガス組成や NOx 値が得られるかどうかを実測し比較・検討することにした。

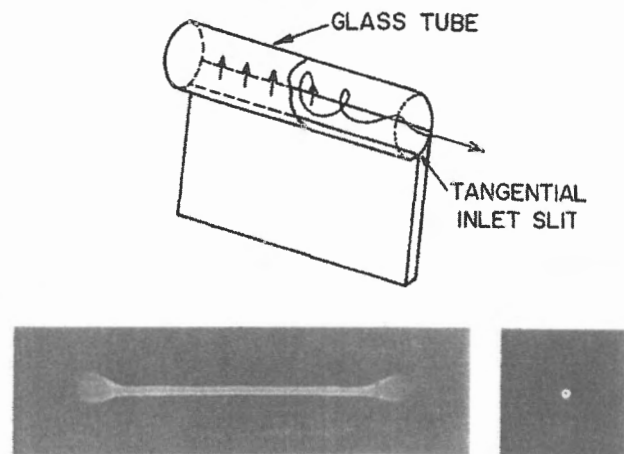


Fig.1 A swirl type tubular flame burner [1].

\* Corresponding author. E-mail: ishizuka@mec.hiroshima-u.ac.jp

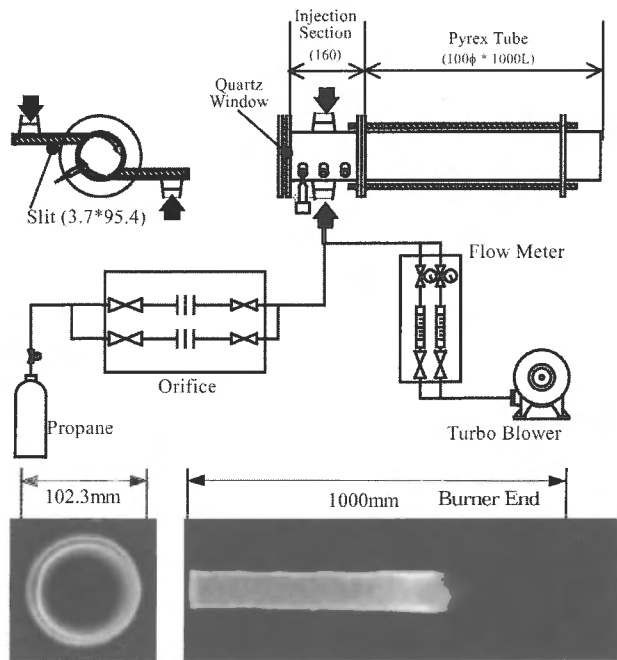


Fig.2 A tubular flame burner (prototype) [5].

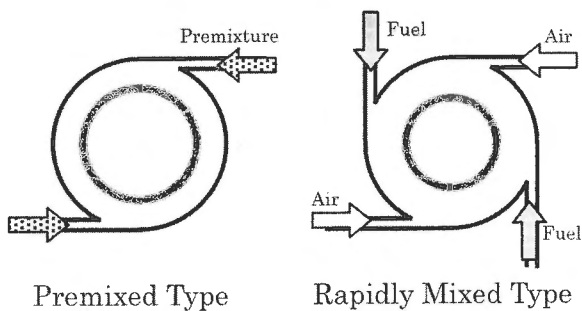


Fig.3 Premixed and rapidly mixed type combustion [6].

## 2. 実験装置および実験方法

図4に、今回用いた管状火炎バーナの概略を示す。バーナ本体は内径 104 mm (4 インチ)、長さ 180 mm の鋼管に、断面 5 mm × 100 mm のスリットを 4 つ対称位置に取り付けたもので、一端には直径 104 mm、厚さ 8 mm の石英板を取り付けて観測窓とし、他端には内径 4 インチ、長さ 830 mm の測定孔付き鋼管を取り付け、燃焼室とした。石英板は、図4に示すようにスリット出口に一致させ、この位置を Z = 0 mm とし、Z = 280, 360, 440, 520, 600, 760, 840, 920 mm の計 8 点に設けられた測定孔において、温度ならびに燃焼ガス組成を測定した。なお、火炎観察時には、鋼管の代わりに長さ 1 m の石英管を使用した。

空気はターボブロア (武藤電機, MI-12N/6, モータ出力: 2.2 kW, 風量: 420 m<sup>3</sup>/h, 最大昇圧: 1300 mmAq) より、燃料であるプロパン (97.5 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + 1.0 % C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> + 1.1 % isoC<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) はポンペより供給し、それぞれ浮き子式面積流量

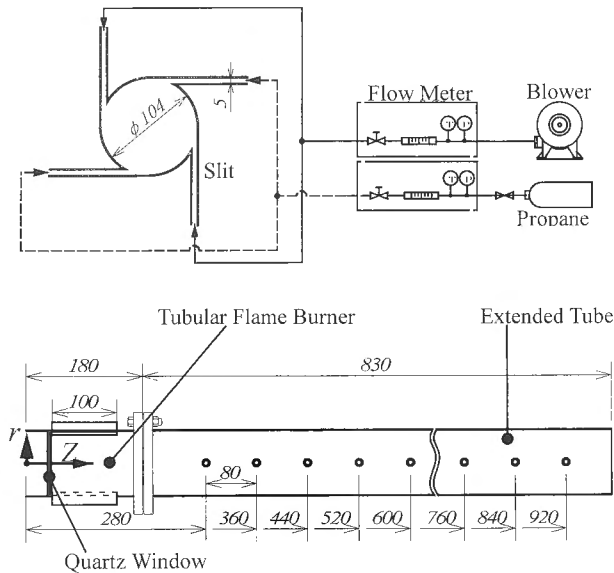


Fig.4 Experimental apparatus.

計で流量を測定したのち、バーナへ供給する。なお、本研究では 2 つの混合方式、すなわち、予混合型 (Premixed Type) と急速混合型 (Rapidly Mixed Type) について実験するが、急速混合型では上下 2 つのスリットから空気を、左右 2 つのスリットから燃料を別々に供給するため、流れの回転は、流量が燃料のそれに比べ 10 倍以上ある空気によって支配される。そこで、予混合型の場合、回転強さを同程度にすべく、予混合気を上下の 2 つのスリットのみから吹き出すことにした。

温度の測定には、白金による触媒作用を防ぐため、二酸化珪素で被覆した素線径 200 μm の R 型熱電対 (Pt-Pt/Rh 13 %) を用いた。一方、燃焼ガスの分析はガスクロマトグラフ (島津 GC-8AIT) により、NO<sub>x</sub> 値は化学発光式 NO<sub>x</sub> 計 (島津 NOA7000) で測定した。

図5に燃焼ガス分析装置の概略を示す。装置はサンプリングプローブ、コンデンサ、ガスクロマトグラフ、真空ポンプ等で構成される。燃焼ガスは、Z = 840 mm の位置において、先端内径 200 μm の石英製サンプリングプローブによって採取される。通常の燃焼ガスの分析では、水分をシリカゲルで除去したドライサンプルを分析するが、本研究では水の分析も行う。そこで、採取した試料を 2 つに分岐し、A と B の 2 台のガスクロで分析を行った。

まず、1 つ目の分析系統であるガスクロ A では、カラムにポラパック (タイプ Q)、キャリアガスにヘリウムを使用し、水のほか二酸化炭素、プロパンの分析を行う。なお、水の分析を厳密に行うため、サンプル回路はヒーターで常に高温 (140 °C) に保ち、水の凝縮を防止した。

一方、2 つ目の分析系統であるガスクロ B ではカラムにモレキュラシーブ 5A、キャリアガスにアルゴンを用い、水素、酸素、窒素、一酸化炭素、メタンの分析を行った。これらのガスを十分分離して精度良く測定するにはモレキ

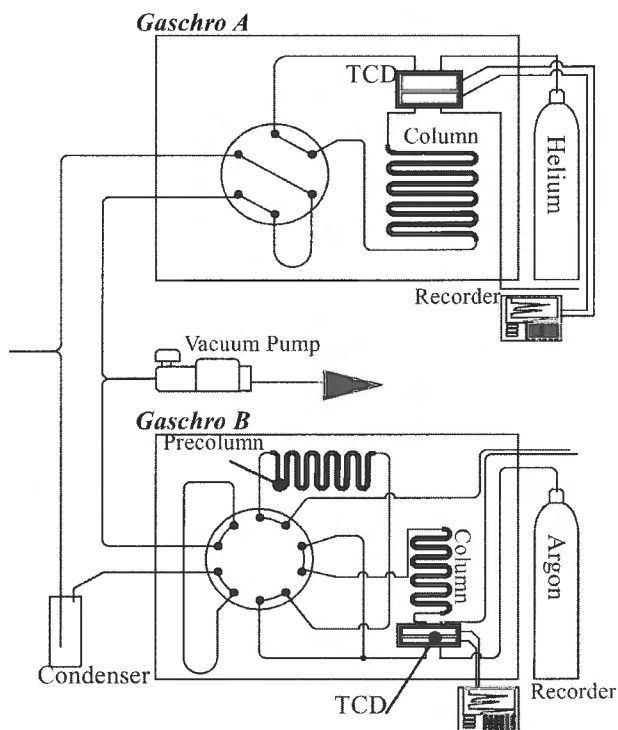


Fig.5 Exhaust gas analyzing system.

ユラシーブのカラムの温度を低く (今回の測定では、55 °C) 設定する必要があるが、それでは水が凝縮する恐れがある。また、モレキュラシーブは炭酸ガスにより被毒されてしまう。そこで、ガスクロ B の直前に水分を除去すべくコンデンサを取り付け、さらに分析回路内にボラパック (タイプ Q) を詰めたプレカラムを設け、水分と炭酸ガスを除去した後、資料ガスをモレキュラシーブのカラムに導入し分析した。

一方、NO<sub>x</sub> 値は、上記組成分析とは別に、燃焼ガスを石英製サンプリングプローブで採取し、常圧式化学発光法による NO<sub>x</sub>-O<sub>2</sub> 計で測定した。なお、測定結果はボイラに関する窒素酸化物排出基準のガス専焼ボイラの基準に従い、酸素濃度 5 % に換算した NO<sub>x</sub> の値で示すこととする。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 火炎外観および燃焼範囲

[予混合型管状火炎燃焼] 対称位置の 2 つのスリットから予混合気を吹き出した場合に得られる火炎の外観を図 6 に示す。ここでは、空気流量 100 m<sup>3</sup>/h のもつで、燃料希薄、理論当量比、燃料過剰の火炎を示す。左は、石英窓から管軸垂直方向から撮影したもの、中央は、スリット出口付近の火炎の様子を観察すべく、鏡を介して少し斜め方向から撮影したもの、右は真横から石英管を撮影したもの (但し、石英管が赤熱し始める以前に撮影) である。いずれの場合も、均一な火炎面をもつ管状の青炎がバーナ本体内に形成されていることがわかる。

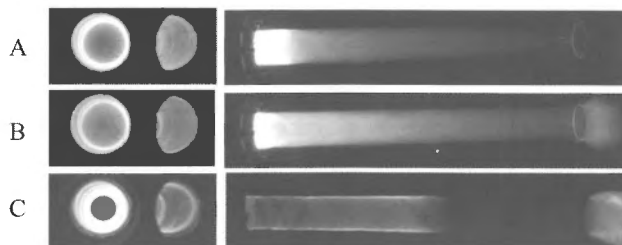


Fig.6 Appearance of flame in the premixed type combustion (A:  $\Phi = 0.85$ , B:  $\Phi = 1.0$ , C:  $\Phi = 1.5$ ).

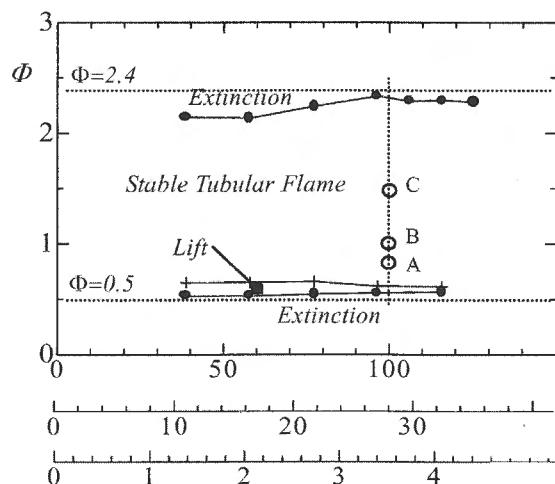


Fig.7 Mapping of various combustion modes of the premixed type combustion (A:  $\Phi = 0.85$ , B:  $\Phi = 1.0$ , C:  $\Phi = 1.5$ ).

理論混合気では火炎は短く、吹き出し部からわずかに出る程度で、石英管内では燃焼ガスの強い輻射がみられるが (図 6B)、燃料濃度を減少させた場合、火炎は伸びて吹き出し部から出て、燃焼ガスの輻射は弱くなっている (図 6A)。一方、燃料過剰側では、火炎が長く伸び、燃焼ガスの輻射は見られず、石英管出口では余剰燃焼と周囲空気との間に拡散燃焼が観察される。

図 7 は、さまざまな燃焼範囲を測定した結果で、縦軸は当量比  $\Phi$ 、横軸には吹き出し空気流量  $Q_a$  のほか、参考に平均吹き出し流速  $V_n$ 、ならびに平均軸方向流速  $V_a$  も示す。また、図中、破線でプロパンの希薄可燃限界 ( $\Phi = 0.5$ ) と過濃火炎限界 ( $\Phi = 2.4$ ) [7] も示す。図中 A, B, C は、図 6 の火炎外観に対応している。

空気流量を一定にして燃料流量を減らしていくと、どの吹き出し流量に対しても、平均して当量比 0.65 付近で火炎が浮き上がり、さらに燃料流量を減らすと当量比 0.5 ~ 0.55 で消炎にいたる。一方、燃料流量を増加させると、火炎が長く伸びつつ直径は小さくなって細り、ついには火炎全体が燃焼管外部へと押し流されて吹き飛ぶが、この限界における当量比の値は、小流量では約 2.3 と過濃限界の値より小さく、流量を増やし  $Q_a = 100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  以上となると 2.4 付近に近づく。したがって、本バーナでは、ほぼプロ

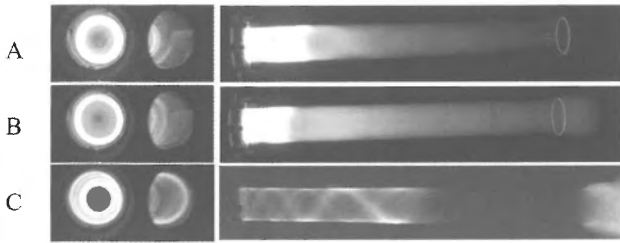


Fig.8 Appearance of flame in the rapidly mixed type combustion (A:  $\Phi = 0.85$ , B:  $\Phi = 1.0$ , C:  $\Phi = 1.5$ ).

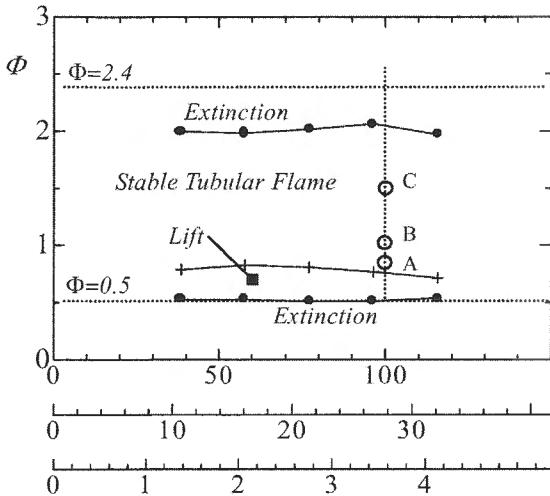


Fig.9 Mapping of various combustion modes of the rapidly mixed type combustion (A:  $\Phi = 0.85$ , B:  $\Phi = 1.0$ , C:  $\Phi = 1.5$ ).

パンの可燃限界範囲内で大きな流量まで予混合型管状火炎燃焼が可能となることがわかる。

【急速混合型管状火炎燃焼】一方、燃料と空気を別々に吹き出して混合する急速混合型管状火炎の外観を図 8 に示す。同じ空気流量に対して、予混合型より若干火炎が長く、また、燃料過剰側では余剰燃料分に起因すると思われる発光むらが認められるが、予混合型同様、理論混合気付近で火炎長さは最も短く、火炎直径は最大となり(図 8B)、燃料濃度を増加あるいは減少させていくと、火炎長は増加し、火炎直径は小さくなる(図 8A, 8C)。

図 9 に、急速混合型の燃焼範囲を示す。縦軸は、燃料と空気が一様に混合したと仮定してもとめた総括当量比である。燃料流量の減少に伴い、低流量では当量比 0.8 付近で火炎が浮き上がるが、吹き出し流量の増加とともに浮き上がりは抑制される傾向にある。さらに燃料流量を減らすと、どの空気流量に対しても当量比 0.5 - 0.55 付近で消炎にいたる。一方、過濃側では、当量比 2.2 付近で火炎が全体が燃焼管外部へ押し出され、予混合型に比べ安定燃焼範囲が若干狭まっていることがわかる。

以上の結果から本バーナでは、予混合型では希薄/過濃可燃限界近くまで火炎が形成されること、また、急速混合型でも、燃料過剰側でやや火炎が発光むらがみられ安定燃

焼範囲も狭いものの、幅広い条件で安定な管状火炎が形成されることが明らかになった。

### 3.2. 温度分布

次に、空気流量を 100 Nm<sup>3</sup>/h に固定して Z = 280, 520, 840 mm の位置において半径方向の温度分布を測定した。それぞれ、管状火炎バーナ直後、燃焼管中間位置、燃焼管出口位置にあたる。

はじめに Z = 280 mm のバーナ直後において、当量比を変化させた場合の結果を図 10 に示す。図は左側が予混合型、右側が急速混合型の結果で、それぞれ、(a)  $\Phi = 0.85$ , (b)  $\Phi = 1.00$ , (c)  $\Phi = 1.50$  の結果である。縦軸に温度[°C]、横軸に半径方向距離[mm]をとる。管中心軸を  $r = 0$  mm とし、燃焼管内径が 104 mm であるので、 $r = -52$  mm が管壁にあたる。また、図 10 には、平衡計算[8]で求めた断熱火炎温度が波線で、被覆された素線径 200  $\mu$ m の熱電対に対し補正式により輻射補正を行った結果を実線で示す。ここで、輻射率  $\epsilon$  は被覆された白金熱電対に対する値として 0.22[9]を用い、燃焼ガスの物性値は、気体分子運動論で与えられる推定式[10]を適用して求めた。燃焼ガス速度には、混合気流量とバーナ断面積から得られる軸方向平均速度を用いた。

さて、予混合型の  $\Phi = 0.85$  の場合(図 10(a) 左)、壁で既に 750 °C と高く、火炎帯へ向かってさらに急激に上昇し、管壁から 9 mm の位置において最高温度 1525 °C を取る。この輻射補正値は 1787 °C であり、図中破線で示される断熱火炎温度 1840 °C に近いことから、バーナ内はほぼ断熱状態に近いことがわかる。ただし、温度は主として輻射熱損失により管中心軸に向けて約 150 °C 低下し、いわゆる管状火炎に特有の M 型の温度分布となる。

一方、急速混合型管状火炎の場合(図 10(a) 右)、温度は管壁でほぼ常温で、火炎帯へ向かって急激に上昇し、管壁から 9 mm の位置において予混合型より高温な 1580 °C (補正温度 1855 °C) を取る。しかし、管軸付近に向けての温度低下が著しく、中心軸付近では予混合型より低い 1280 °C (補正温度 1420 °C) となる。最高温度が予混合型のそれより高温であること、さらにこれに対する補正温度が 1855 °C と  $\Phi = 0.85$  における断熱火炎温度 1843 °C を若干上回っていること、また、管中心軸に向けて急速な温度低下があり、これは輻射熱損失だけでは説明できないので、急速混合型では予混合型とは異なる火炎構造となっていると思われる。

なお、急速混合型では、管壁付近は常温に保たれるが、これは予混合火炎と異なり火炎が管壁付近の混合領域を越えて上流側(壁側)に伝播できないためと考えられる。

さて、次に  $\Phi = 1.0$  の場合(図 10(b)), 予混合型では(●)  $\Phi = 0.85$  の時とほぼ同様の温度分布となっているが、管壁付近ですでに 1000 °C を上回る高温となっている。これは燃焼速度の上昇に伴い、火炎が未燃ガス側である管壁に近づき、火炎直径が大きくなったことに対応している。また、

最高温度については、補正を考慮するとほぼ断熱火炎温度と同程度となっている。一方、急速混合型管状火炎では(○)、管壁は常温に保たれ、火炎帯へ向かって急激に上昇し最高温度を取るが、この最高温度は、予混合型に比べると若干低いものの断熱火炎温度に近い温度となっている。その後、温度は管軸へ向けて低下するが、予混合型のようななだらかな低下ではなく、一度わずかに上昇した後に温度が低下している。したがって、希薄混合気の場合と同様、急速混合型と予混合型では火炎構造がかなり違うことが示唆される。

$\Phi = 1.5$  の場合(図 10(c)), 予混合, 急速混合を問わずどちらも補正した最高温度はほぼ断熱火炎温度となっているが、予混合型ではこれまでと同様の単純な M 型分布で、管壁から 12 mm の位置で最高温度 1611 °C をとり、その後、中心軸に向かってなだらかに減少するのに対し、急速混合型では、管壁側から急激に上昇した後も緩やかに温度が上昇し、また、中心軸に向けた温度の下降もやや不連続的で複雑な火炎構造が示唆される分布となっている。

以上のことから、 $Z = 280$  mm において予混合型, 急速混合型ともに、すべての条件において断熱火炎温度に近い火炎温度が得られているものの、温度分布を詳しく比較すると、予混合型では従来通りの滑らかな M 型の温度分布をとるのに対し、急速混合型では、ところどころで複雑に温度分布が変化すること、中心部で大きな温度降下が見られることなどから、予混合型とは異なる複雑な火炎構造をもつことが示唆される。

次に、当量比 1 の火炎に対して、燃焼室中間位置  $Z = 520$  mm と出口付近  $Z = 840$  mm での半径方向への温度分布を測定した。その結果を  $Z = 280$  mm の結果とともに図 11 に示す。但し、複雑さを避けるため輻射補正した結果は省く。

予混合型の場合、 $Z = 280$  mm の M 型分布から  $Z = 520$  mm (図 11(b) 左) では緩やかな山形の分布となり、熱が拡散していく様子がわかる。さらに下流の出口付近 ( $Z = 840$  mm, 図 11(c) 左) では、温度が一様となる。

一方、急速混合の場合、 $Z = 280$  mm (図 11(a) 右) では、前述のように、少し複雑な M 型分布となっているが、 $Z = 520$  mm 位置 (図 11(b) 右) では、予混合型と同様に山形の分布となり、 $Z = 840$  mm (図 11(c) 右) では予混合型と比べほぼ同様な温度分布となっていることがわかる。

以上、予混合型, 急速混合型ともに、半径方向温度分布は、燃焼管下流側に進むにつれ M 型から山形の分布となり、出口付近ではほぼ同様な温度分布となることが明らかになった。

### 3.3. 燃焼ガス分析

次に、燃焼管出口付近 ( $Z = 840$  mm) で、管軸上で採取した燃焼ガスの分析結果を表 1 に示す。参考に、NASA の GORDON プログラム[8]により得られた化学平衡計算の結果もあわせて示す。但し、平衡計算を行う際、あらかじめ

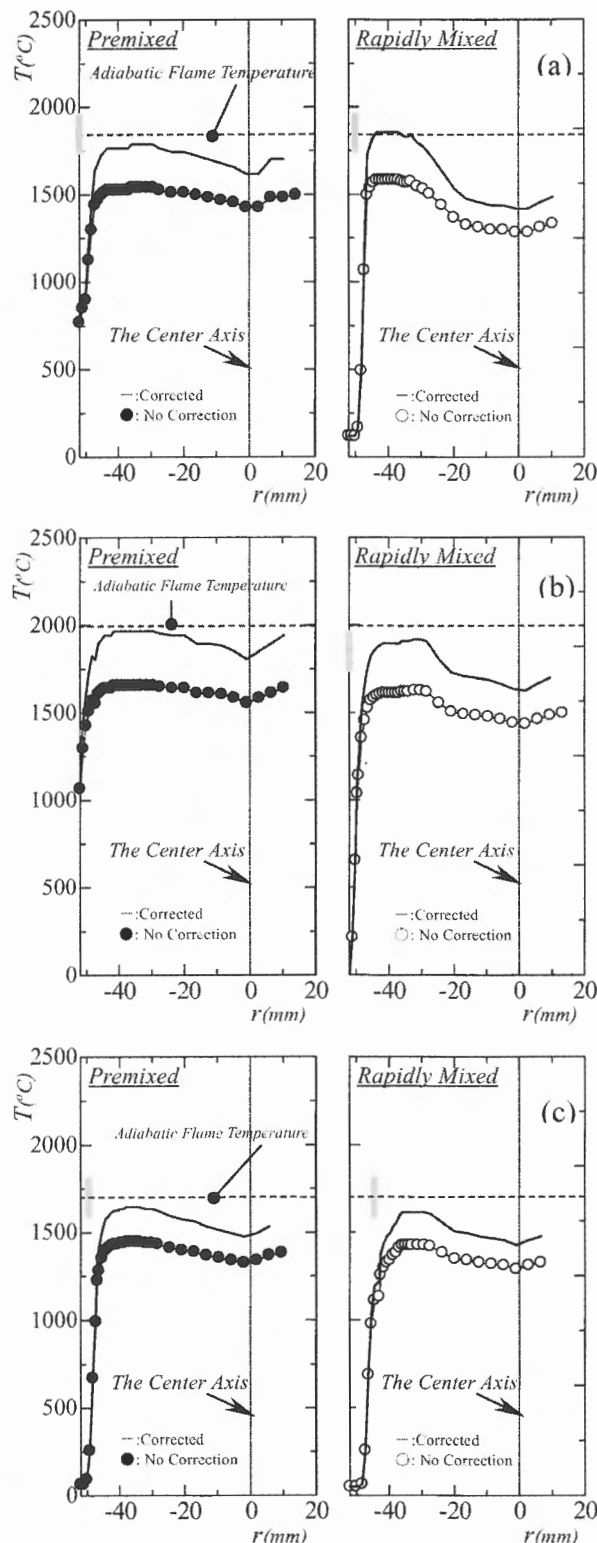


Fig.10 The radial temperature distribution at  $Z=280$  mm ((a)  $\Phi = 0.85$ , (b)  $\Phi = 0.51$ , (c)  $\Phi = 1.5$ ).

Table 1 Exhaust gas compositions of premixed and rapidly mixed tubular flame. ( $Qa = 100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ )

Composition	$\Phi=0.85$			$\Phi=1.0$			$\Phi=1.5$		
	Measured		Calculated	Measured		Calculated	Measured		Calculated
	Premixed	Rapid Mixing	(Wet Air)	Premixed	Rapid Mixing	(Wet Air)	Premixed	Rapid Mixing	(Wet Air)
CO <sub>2</sub>	9.5	9.6	9.5	10.8	10.7	10.3	5.0	4.7	5.0
H <sub>2</sub> O	15.7	15.6	15.5	16.8	16.5	17.3	14.1	13.7	15.2
CO	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.9	9.3	9.6	10.2
H <sub>2</sub>	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.3	11.7	12.0	7.6
O <sub>2</sub>	2.2	2.1	2.9	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
N <sub>2</sub>	68.6	69.6	70.6	70.7	69.3	69.4	57.8	59.0	61.3
NO	—	—	0.3	—	—	0.2	—	—	0.2
Total	96.0	96.8	98.8	98.7	97.7	98.9	98.0	99.0	99.5

※Wet Air = (21%O<sub>2</sub> + 76%N<sub>2</sub> + 1%Ar + 2%H<sub>2</sub>O)

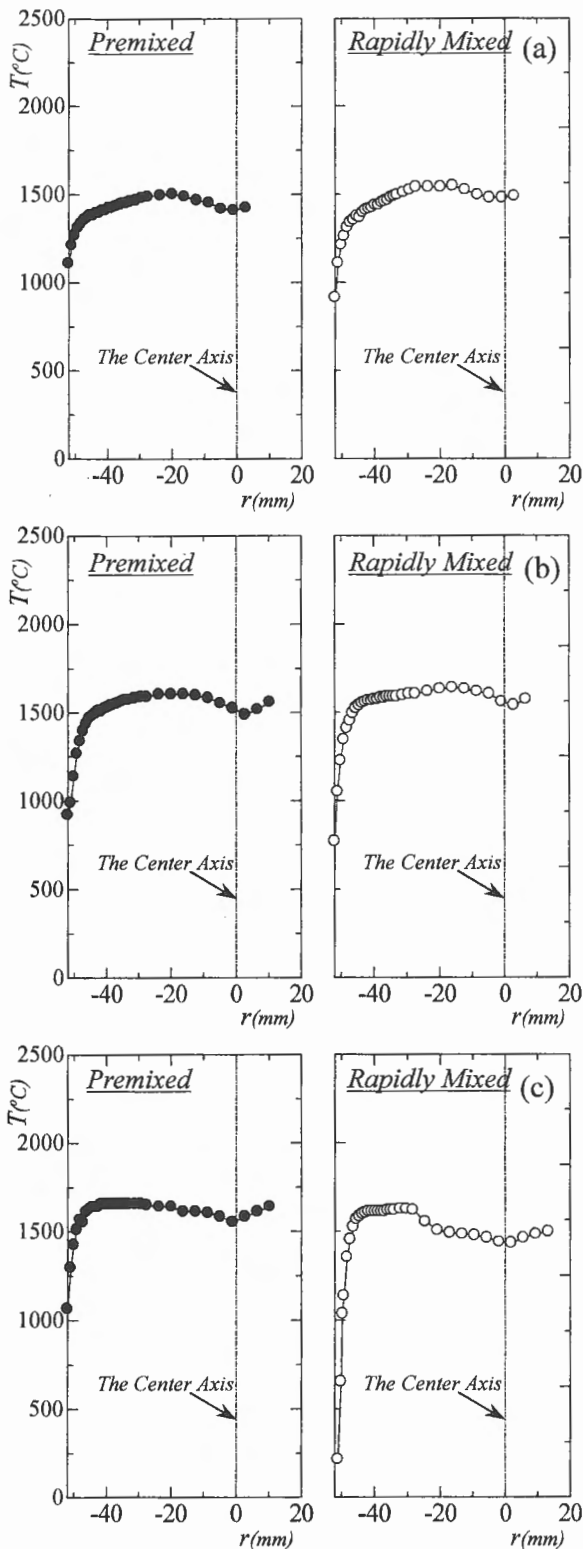


Fig.11 The radial temperature distribution at Z = (a) 840, (b) 520, and (c) 280 mm.

未燃混合気をガスクロで測定し,  $\Phi = 1.0$  では 4.08 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + 20.33 % O<sub>2</sub> + 71.66 % N<sub>2</sub> + 2.00 % H<sub>2</sub>O + 0.04 % CO<sub>2</sub>, (合計 98.11 %) と 2 % の水分を検出したため, 空気の組成としては 21 % O<sub>2</sub> + 76 % N<sub>2</sub> + 1 % Ar + 2 % H<sub>2</sub>O の湿り空気を仮定した. なお, 表 1 で化学平衡計算による平衡濃度の合計値が 100 % となっていないが, 表示されていない微量化学種の濃度を加えれば当然 100 % となる.

まず, 分析精度であるが, いずれの当量比でも, 各成分の測定値の合計値は 96.01 % から 98.70 % 以内にあり, 表 1 に示された化学平衡計算値の合計と比べも相対比較値で最大 3 % 以内で一致している. また, 本分析でアルゴンをキャリアガスとして使用したために検出できない空気中のアルゴン約 1 % を考慮すれば, 測定値の合計はほぼ 100 % に近い値となるので, 予混合燃焼と急速混合燃焼を比較するには十分信頼性のある分析となっている.

さて, 燃焼ガス中の各化学種の濃度であるが,  $\Phi = 0.85, 1.0$  の希薄・理論混合気では, ほぼ化学平衡濃度に近い値が得られており, また, 予混合型, 急速混合型でほとんど一致した値となっている. 一方,  $\Phi = 1.5$  の燃料過剰な混合気では, 化学平衡濃度に比べ水分がやや低く, 水素もかなり高くなっており, まだ, 十分平衡に達していないように見受けられるが, 予混合型, 急速混合型を比べると各成分ともほぼ同様の値となっている.

したがって, 急速混合型でも予混合型とほぼ同様の燃焼ガス組成が得られることが明らかになった.

### 3.4. NO<sub>x</sub> 値

次に, 空気流量を 100 Nm<sup>3</sup>/h と固定し, NO<sub>x</sub> 値と燃焼ガス温度の軸方向変化を中心軸上で測定した. その結果を図 12 に示す. 上図は温度を, 下図は酸素濃度 5 % に換算した NO<sub>x</sub> 値を示す. 横軸はバーナ端からの距離 Z である. なお, 参考に, 目視による発光帯の末端の位置を予混合型は P, 急速混合型は R の矢印で示す.

燃料希薄の場合 (図 8(a),  $\Phi = 0.85$ ), 予混合型 (●) では吹き出し部出口で最高温度をとり, 単調に下流側に向かって減少するが, 急速混合 (○) では吹き出し部をでてからも

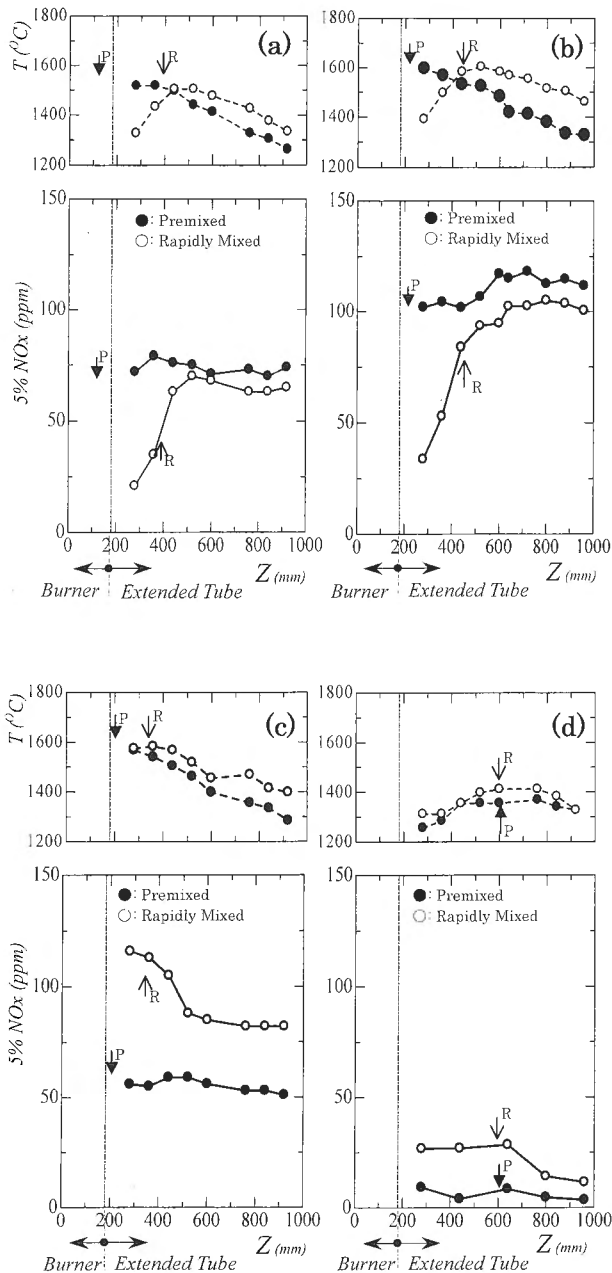


Fig.12 The axial distribution of NOx for various equivalence ratios.  
 ((a)  $\Phi = 0.85$ , (b)  $\Phi = 1.0$ , (c)  $\Phi = 1.15$ , (d)  $\Phi = 1.5$ ).

上昇し、発光帯末端付近で最高となり、その後下流に向かって徐々に減少する。ここで、それぞれの発光帯直後の温度を比較してみると、予混合型は  $Z = 280$  mm で  $1520^\circ\text{C}$ 、急速混合型は  $Z = 520$  mm で  $1505^\circ\text{C}$  と、ほぼ同程度の温度であることがわかる。また、 $Z = 280 \sim 440$  mm の間で急速混合が低温であるが、これは中心軸上での温度であり、前述の半径方向温度分布の結果 (図 10(a)) をみると、火炎帯での最高温度は予混合型より急速混合型の方が高温であると考えられる。

さて、 $\Phi = 0.85$  における NOx 値を比較すると (図 12(a) 下図)、予混合の場合 (●)、吹き出し部直後で 72 ppm に達し、出口に向かって徐々にほぼ一定に推移するが、急速混

合の場合 (○) は、吹き出し部付近で 21 ppm とかなり低く、その後、急速に増加するが、出口付近では 65 ppm と予混合型燃焼に比べ 1 割程度低い値となっている。

次に、 $\Phi = 1.0$  の場合 (図 12(b))、温度・NOx 値ともに  $\Phi = 0.85$  の場合とほぼ同様の傾向の分布をとる。温度は、発光帯直後で予混合型  $1597^\circ\text{C}$ 、急速混合型  $1605^\circ\text{C}$  と同程度となるが、希薄混合気の場合に比べ高いため NOx 値は予混合型、急速混合型のいずれの場合も、下流にいく程上昇している。しかし、総じて急速混合型の方が NOx 値は低く、出口付近において、予混合型 115 ppm に対し急速混合型は 99 ppm と 15% 程度低い値となっている。

そこで、少し詳しく、 $\Phi = 1.15$  でも測定した (図 12(c))。このとき、発光帯末端位置は、予混合型、急速混合型で差異が少なく、温度分布も全体的に急速混合型のほうが  $20^\circ\text{C}$  程度高温となっている程度である。しかし、NOx 値は、予混合型では吹き出し部直後で 56 ppm で、出口に向かってほぼ一定で推移するのに対し、急速混合型では吹き出し部付近では 116 ppm とかなり高く、その後減少するが、出口付近でも 82 ppm と予混合型に比べ高い値となり、希薄・理論混合気の傾向とは逆になっている。おそらく、局部的に理論混合気に近い状態で反応している領域があるため、急速混合型の方が予混合型に比べ NOx 値が高くなったものと推察される。

最後に、燃料過剰の  $\Phi = 1.5$  の場合を調べた (図 12(d))。  $\Phi = 1.15$  と同様、発光帯末端位置は、予混合型、急速混合型でほとんど一致し、温度も急速混合型がほんのわずかに高いだけである。しかし、NOx は、急速混合型の方が、予混合型に比べ高くなっている。ただし、その値は予混合型 4 ppm、急速混合型 11 ppm と、非常に低い値となっている。これは、酸素不足のためと考えられる。

以上、予混合型では NOx 値は燃焼管内でほぼ一定であるのに対し、急速混合型では希薄・理論混合気では下流にいくにつれ上昇、過濃混合気では減少する傾向があること、出口での NOx 値は、希薄・理論混合気では急速混合燃焼により 10 ~ 15% 減少するのに対し、過濃混合気では逆に大きくなること、が明らかになった。

したがって、外見上は別にして、火炎構造も NOx の生成メカニズムも急速混合型燃焼は予混合型燃焼とは異なるものと考えられる。

#### 4. 結論

内径 100 mm (4 インチ) の管状火炎バーナを用い、燃料にプロパン、空気流量  $Q_a = 100 \text{ m}^3/\text{h}$  の条件で予混合型、急速混合型管状火炎を形成させ、火炎形成限界、温度分布、燃焼ガス組成、NOx 値の測定を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

1. 急速混合型の場合、予混合型に比べ特に過濃側で安定燃焼できる濃度範囲が若干狭まるものの、幅広い範囲で安定な火炎が形成される。

2. 半径方向温度分布測定の結果では, 最高温度は各混合方式ともに断熱火炎温度に近い温度に達する. また, 予混合型では管状火炎に特有の M 形の温度分布を取るが, 急速混合型では少し複雑な分布形状が確認された. ただし, どちらの燃焼方式でも, 燃焼管出口付近ではほぼ同一の温度分布となる.
3. ガスクロマトグラフによる燃焼ガス分析結果から, 予混合型, 急速混合型ともに, 二酸化炭酸, 水, 一酸化炭素, 水素, 酸素, 窒素の濃度はほとんど一致する.
4. NO<sub>x</sub> の軸方向分布は, 予混合型では軸方向にほぼ均一な分布が得られたのに対し, 急速混合型では, 希薄・理論混合気では燃焼管出口に向かって上昇, 過濃混合気では逆に減少する傾向がある. また, 両燃焼方式を比較すると, 急速混合型では, 希薄・理論混合気では, 予混合型に比べ NO<sub>x</sub> の値は 10 ~ 15 % 低くなる.

以上, 急速混合型管状火炎燃焼では, 逆火が起こらず安全な上, 燃焼ガス組成が予混合型燃焼と遜色なく, また, NO<sub>x</sub> 値を予混合型より低減できるという次世代型バーナとしての大きな潜在性を持つことが明らかとなった.

## 謝辞

本研究は, 新エネルギー・産業技術総合開発機構の平成 14 年度基盤技術研究促進事業「次世代型バーナシステムの開発」によるものであり, ここに記して謝意を表す. また, 本研究遂行に当たりご協力頂いた JFE スチール株式会社に感謝の意を表す.

## References

1. Ishizuka, S., *Proc. Combust. Inst.* 20: 287-294 (1984).
2. Ishizuka, S., *Combust Flame* 75: 367-379 (1989).
3. Ishizuka, S., *J. Loss Prev. Process Ind.*, 4: 185-193 (1991).
4. Ishizuka, S., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 19: 187-226 (1993).
5. Ishizuka, S., Hagiwara, R., Suzuki, M., Nakamura, A., Hamaguchi, O., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 65: 3845-3852 (1999).
6. Ishizuka, S., Suzukawa, Y., Ishioka, M., and Okada, K., *Proc. Thermal Conference '03*, JSME No.03-30: 553-554 (2003).
7. Zabetakis, M. G., *Bull. US Bureau Mines.*: 627 (1965).
8. Gordon, A. and McBride, B. J., *NASA Spec. Publ.*, 273 (1971).
9. Kaskan, W. E., *Proc. Combust. Inst.* 6: 134-143 (1957).
10. Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F., Bird, R.B., *Molecular Theory of Gases and Liquids*: 514-610 (1954).