

## 高圧下におけるメタン-酸素同軸乱流非予混合火炎の 流動場特性に関する研究

### Investigation on Characteristics of Flow Field of Methane-Oxygen Coaxial Turbulent Non-premixed Flame at High Pressure

飯野 公夫\*      村上 真二\*      赤松 史光\*\*      香月 正司\*\*  
IINO Kimio      MURAKAMI Shinji      AKAMATSU Fumiteru      KATSUKI Masashi

高圧下におけるメタン-酸素同軸乱流非予混合火炎の非燃焼時および燃焼時に対する LDV (Laser Doppler Velocimetry) による流動場計測を実施し、数値シミュレーション結果との比較を行った。流動場計測からは、燃焼時には圧力上昇に伴って、乱流エネルギーは増大し、乱流混合が促進され、さらに圧力上昇に伴って乱れの非等方向性が増大していくことが確認できた。また数値シミュレーション結果との比較においては、非燃焼場における予測値は  $k-\varepsilon$  モデルが計測値と良い一致を示し、燃焼時における予測値は RSM/PDF の組み合わせが計測値と最も良い一致を示すことを確認することができた。

We carried out the flow field measurement using LDV on methane-oxygen coaxial turbulent non-premixed flame in the case of non-combusting and combusting under high pressure. And then the results of the measurement were compared to simulated figures. From flow field measurements, we found that: turbulent energy in combusting situation increased with pressure rising, therefore turbulent mixing was enhanced and also turbulence was more anisotropic in all regions of the flow comparing to those of non-combusting situation. From the comparison of the numerical results of each measurement data, the results are good agreement with the  $k-\varepsilon$  model in the case of non-combusting and the RSM/PDF model in the case of combusting situation.

#### 1. はじめに

酸素燃焼はエネルギー効率の向上と環境負荷低減をもたらす技術として、多くの工業プロセスに導入が進んでいる<sup>1-3)</sup>。しかしながら、酸素燃焼に関する情報は限られたものしか存在せず<sup>4, 5)</sup>、特に高負荷化の観点から重要である高圧下での燃焼挙動に関する情報は空気燃焼においても極めて少ないものとなっており、酸素燃焼を対象とした研究事例は存在せず、詳細な燃焼挙動に関する実験データは存在しない。

そこで本研究では、高圧下での連続燃焼試験を可能とする実験設備を製作し、高圧下の乱流非予混合酸素燃焼火炎を対象として詳細な実験計測を行い、圧力による火炎構造の変化を詳細に観察することを目的

とした。本報では、特にメタン-酸素同軸乱流非予混合火炎を対象に、非燃焼時と燃焼時の流動場に対して LDV 計測を行い、乱流構造に関して両者の比較・検討を行った。さらに広く利用されている乱流モデルや乱流燃焼モデルがどの程度高圧燃焼場で適用可能であるかを検証した。

#### 2. 実験装置および実験方法

##### 2.1 高圧燃焼実験設備

Fig. 1 に高圧燃焼実験設備の概略図を示す。実験設備は高圧燃焼実験炉を中心として、燃料・酸素供給系、炉内圧力調節系、計測用3次元トラバース装置、酸素バーナ等から構成されている。水冷ジャケットつき酸素バーナは  $z$  軸トラバース装置に固定され、燃料および酸素の噴射ノズル噴孔径を変えることにより、各噴出流速条件に合わせた実験が可能である。トラバース

\* 開発・エンジニアリング本部山梨研究所燃焼技術センター  
\*\* 大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻

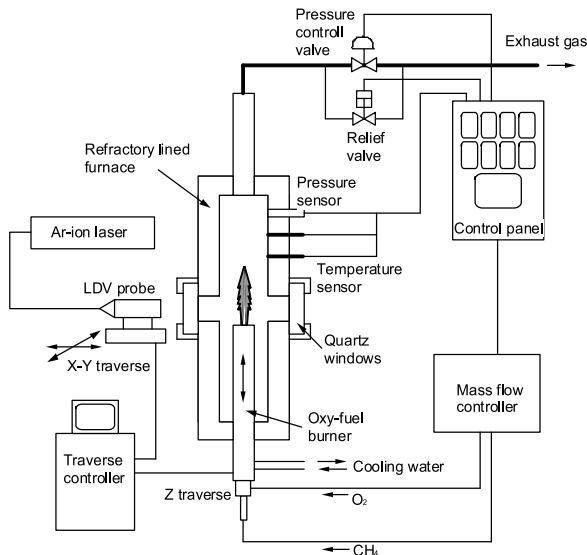


Fig. 1 Schematic of high pressure experiment facility.

装置の各軸方向の移動分解能は $2\mu\text{m}$ であり、移動範囲は燃料ノズル中心を原点にして x-y 軸が $\pm 50\text{mm}$ 、z 軸は $0\sim 300\text{mm}$ となっている。

今回の実験ではメタン-酸素の同軸乱流非予混合火炎を測定対象とした。非燃焼時および燃焼時の測定条件をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示す。

### 2.2 光学配置およびレーザ計測

流速測定は、後方散乱型の2次元 LDV システムを用いて、燃料メタン中にシード粒子 ( $\text{SiO}_2$ , 平均粒径  $2.5\mu\text{m}$ ) を混入させて行った。計測サンプル数は各条件 10000 個とし、計測は5回繰り返して行い、平均値を算出した。また、乱流スケールの算出を行う計測位置においては、その際のデータレートは最低でも  $5\text{kHz}$  以上となるように光学系を調整した。計測はすべての条件で、中心軸上の分布計測および燃料ノズル

から上方の位置において半径方向分布を計測した。

## 3. 実験結果

### 3.1 高圧下での火炎観察

はじめに、デジタルカメラを用いて、直接写真による火炎観察を行った。Fig. 2に0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0MPaにおける火炎の直接写真を示す。0.1MPaの条件では燃料ジェットのリノルズ数 ( $Re$ ) が3390と低いため層流火炎の様相を呈しており、その後、圧力の上昇に伴い、密度増加による動粘性係数の低下により燃料ジェットのリノルズ数が増大し、乱流火炎へと遷移していく様子が観察される。従来の噴流火炎の研究<sup>6)</sup>では、大気圧下において燃料噴出流速を増加させ、 $Re$ の変化による火炎形状の変化を観察しているが、本研究の場合には、雰囲気圧力を変化させ流体密度を増加させることによって  $Re$  を変化させているにもかかわらず、他の研究と同様に、 $Re$ の増加に伴い火炎長が変化していく様子をはじめて観察された。火炎全体の長さは0.2MPa以上の圧力ではほとんど差異がないが、その様子はまったく異なっている。すなわち、燃料噴流のコア領域が燃料ノズル出口から上方に向かって火炎中心部に存在するが、その長さが圧力上昇に伴って短くなっていく様子が観察され、その後流に存在する白色を帯びて激しく反応している領域が、燃料ノズルに近づいていることがわかる。さらに、その白色を帯びた領域は、圧力の上昇にともなって火炎後流まで広がっていく様子も確認できる。また火炎周辺部において、火炎位置の変動が大きくなるとともに、火炎の占める体積が大きくなっていく様子が観察される。

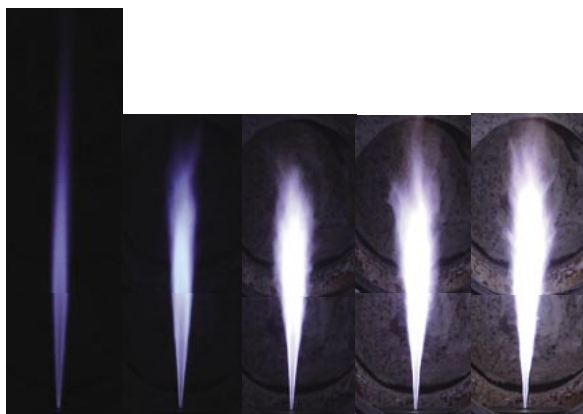
次に  $\text{CH}^*$  (以後、「\*」マークは励起化学種を意味し、

Table 1 Experimental parameters and gaseous properties on cold flow.

Pressure	(MPa)	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0
$\text{N}_2$ mass flow rate (Fuel nozzle)	(kg/h)	0.185	0.370	0.925	1.295	1.850
$\text{N}_2$ mass flow rate (Oxidizer nozzle)	(kg/h)	0.444	0.888	2.220	3.108	4.440
Density at 300K	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.12	2.25	5.62	7.86	11.25
Viscosity at 300K	( $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9
Kinematic viscosity at 300K	( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.6 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-6}$

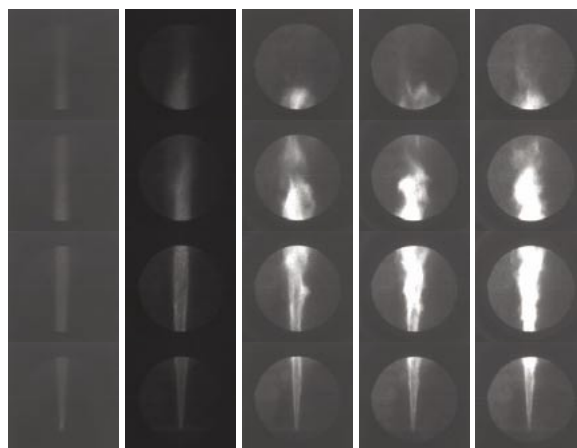
Table 2 Experimental parameters and gaseous properties on combusting flow.

Pressure	(MPa)	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0
$\text{CH}_4$ mass flow rate (Fuel nozzle)	(kg/h)	0.106	0.212	0.531	0.743	1.062
$\text{O}_2$ mass flow rate (Oxidizer nozzle)	(kg/h)	0.508	1.016	2.540	3.556	5.080
$\text{O}_2$ mass flow rate (Outer flow)	(kg/h)	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080
Thermal input	(kW)	1.5	3.0	7.5	10.5	15.0
Density at 300K ( $\text{CH}_4$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	0.644	1.288	3.220	4.508	6.442
Viscosity at 300K ( $\text{CH}_4$ )	( $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	11.17	11.17	11.19	11.19	11.23
Kinematic viscosity at 300K ( $\text{CH}_4$ )	( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.7 \times 10^{-5}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-6}$



(a)0.1MPa (b)0.2MPa (c)0.5MPa (d)0.7MPa (e)1.0MPa

Fig. 2 Direct photographs of flame.



(a)0.1MPa (b)0.2MPa (c)0.5MPa (d)0.7MPa (e)1.0MPa

Fig. 3 Image of CH\* radical chemiluminescence.

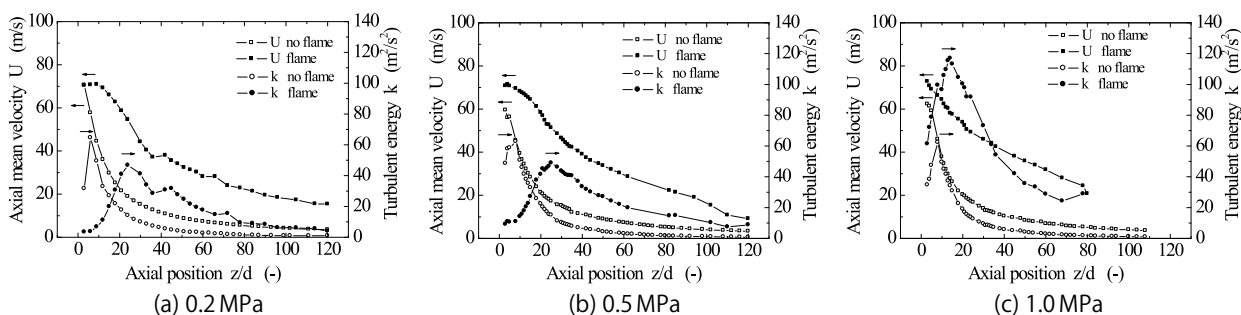


Fig. 4 Axial profiles of axial mean velocity and turbulent energy.

マークがないものは基底化学種を意味する)の自発光強度分布を観察するために、バンドパスフィルター(CH\*バンド:中心波長430.5nm)を装着してハイスピードカメラにて写真観察を行った結果をFig.3に示す。大気圧下ではCH\*が火炎全体に分布している様子がうかがえるが、圧力が上昇するに伴って、火炎渦構造が現れてくる領域で発光強度が大きくなり、分布領域も大きく広がっていくことが観察できる。さらにその領域は、圧力上昇に伴い燃料ノズルに近いところから高い発光強度を示すようになる。CH\*生成機構についてはC<sub>2</sub>反応経路の最終段で生成されるものが支配的である<sup>7,8)</sup>とされていること、さらに著者らの対向流拡散火炎を対象にした高圧下での反応経路に関する研究<sup>9)</sup>で得られた、C<sub>2</sub>反応経路が活性化されるといふ数値解析結果と一致することから、上記観察結果は高圧下においてはC<sub>2</sub>反応経路が活性化されていることを示すものと考えられる。

### 3.2 流速測定と乱流構造

燃料噴流の乱流構造に対する熱発生の影響を調べるために、それぞれ非燃焼時および燃焼時の軸方向の平均流速成分、乱流統計量の計測を行った。非燃焼時の実験は、すべての供給ガスを窒素として、燃焼時の噴出速度と同じになるように流量設定を行った。シード粒子は非燃焼時、燃焼時ともに燃料ラインに混入した。

Fig.4に圧力0.2, 0.5, 1.0MPaの場合の非燃焼時および燃焼時の軸方向平均流速と乱流エネルギーの中心軸上分布を示す。すべての雰囲気圧力において、燃焼時には温度上昇に起因する体積膨張によって、すべての測定点で非燃焼時の流速より大きい値を示している。さらに燃焼時には非燃焼時に比較して軸方向の速度減衰が小さいことが確認できる。これらは大気圧下で行われた乱流非予混合火炎に関する研究<sup>10)</sup>と一致しており、今回高圧下においても同様な傾向を示していることを実験的に確認した。次に乱流エネルギーについて見ると、燃焼時のピーク位置は非燃焼時よりも後流に現れることが確認できる。またピーク位置後流では、非燃焼時より燃焼時の方が大きな値を維持していくこともわかる。

次に、非燃焼時の軸方向平均流速分布を各圧力について比較すると、その分布形状は測定領域においてほとんど差異がないことがわかる。また非燃焼時の乱流エネルギーの強度分布については、燃料ノズルから噴出されたのち急速に増大し、z/d=10程度の位置においてピークを示し、その後急速に減衰していく。これらの傾向は圧力によらずほとんど差異はなく、ピーク強度についてもほとんど変化がないことを確認した。

一方、燃焼時の測定結果について各圧力において比較する。はじめに軸方向平均流速を見ると、燃料ノズ

ルから  $z/d=30$  程度までの分布形状において、圧力上昇に伴って速度減衰が大きくなっており、燃料ノズル噴出直後から速度減衰が始まっていることが確認できる。同時に、この領域での乱流エネルギーの強度分布を比較すると、すべての圧力においてこの領域にピークが存在し、圧力が上昇するにしたがって乱流エネルギーは増大している。さらにピーク位置は燃料ノズル側にシフトし、噴出直後ですでに大きな乱流エネルギーを示す。そしてピーク強度も増大し、ピーク位置以降でも乱流エネルギーは圧力上昇とともに増大していることが確認できる。

以上のように、非燃焼時には圧力上昇による軸方向平均流速および乱流エネルギーへの影響はほとんどないにもかかわらず、燃焼時には圧力上昇に伴い、平均流から乱流へのエネルギー移行が活性化され、乱流混合が促進されていることを示す結果が得られた。これは混合律速の系では燃焼反応の促進に密接に結びつく結果であり、直接写真観察や  $CH^*$  自発光写真観察で得られた知見を裏付けるものとなっている。

Fig. 5 に各雰囲気圧力における  $z/d=6.25$  での軸方向平均流速および乱流エネルギーの半径方向分布を示す。中心部で燃焼時の軸方向平均流速は非燃焼時に比較して半径方向への減衰が抑制され、燃焼時の噴流幅が広がっている傾向が確認できる。また圧力上昇にともなって、非燃焼時には測定領域全体にわたって軸方向平均流速が減少する方向にシフトするが、燃焼時には中心部ではほとんど差異が存在せず、噴流外側に

近づくにしたがって若干減少する傾向である。

次に乱流エネルギーについてみると、中心部では非燃焼時の方が大きな値を示し、燃焼に伴う熱発生による動粘度上昇に起因すると推測される乱れの抑制が見られる。さらに燃焼時には噴流外側でピーク値を示している。次に圧力変化による特性値の変化をみると、燃焼時には、圧力上昇に伴い中心部で乱流エネルギーが増大し、噴流外側ではピーク強度も増大する。そしてそのピーク強度は、圧力 0.5 MPa で非燃焼時とほぼ同等の値を示し、その後燃焼時の方が大きくなることを確認できる。以上のように、半径方向では乱流エネルギーと平均流速との関係には、中心軸上ノズル近傍での乱流エネルギーの増大と平均流速の減衰という関係性が見られず、その度合いが小さいことが分かる。この一因としては、本来乱流エネルギーの増大により、平均流速は減衰するが、噴流外側では混合の促進により、燃焼反応が促進され、温度上昇による熱膨張によって流体の加速が起り、半径方向ではこの流体速度の減衰と加速の相殺によって変化が少ないものと推測される。

Fig. 6 に各雰囲気圧力における  $z/d=50$  での非燃焼時および燃焼時のレイノルズ応力成分 ( $u'^2, v'^2$ ) の半径方向分布を示す。レイノルズ応力軸方向成分、半径方向成分ともに噴流外側を除いて燃焼時の場合の方が非燃焼時よりも全領域で大きくなっている。また、非燃焼時には両成分ともに圧力上昇に因らず、ほぼ同じ値を示し、半径方向分布も一定値となっており、こ

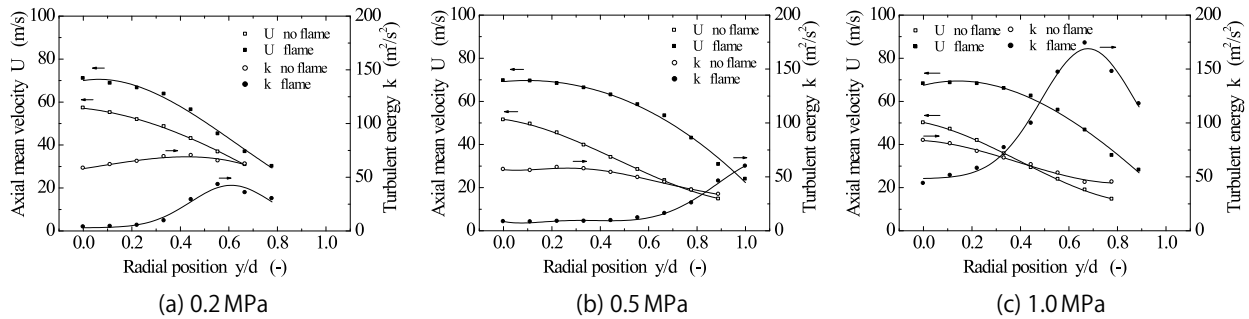


Fig. 5 Radial profiles of axial mean velocity and turbulent energy at  $z/d=6.25$ .

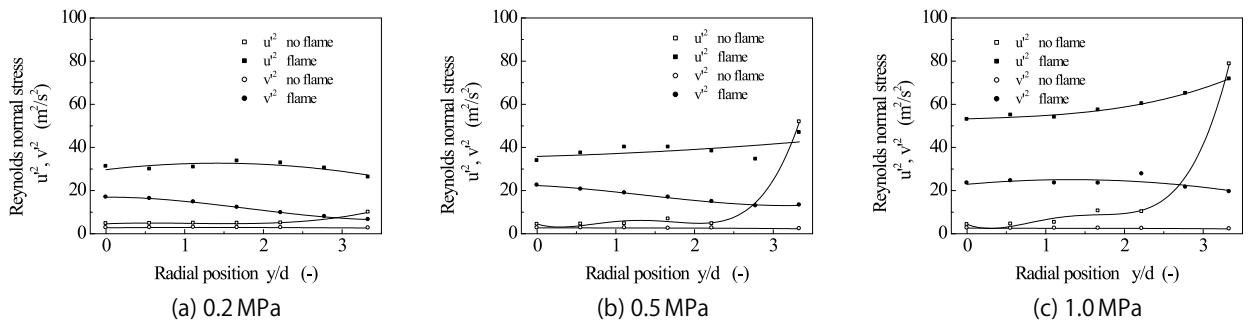


Fig. 6 Radial profiles of Reynolds normal stress at  $z/d=50$ .

の領域ではすでに乱れが等方性になっていることがわかる。一方、燃焼時には両成分はともに半径方向にほぼ一定であり、両成分の差異は2倍程度となっている。また圧力上昇によって、両成分ともに増大するが、その差異は大きく変化しないことを確認した。以上のことから、圧力上昇によってすべての領域で非燃焼時に比較して燃焼時には非等方性が強くなっていくことが確認できた。

#### 4. 数値解析方法および解析対象

##### 4.1 乱流モデルおよび乱流燃焼モデル

今回の数値解析では汎用数値解析コード FLUENT を使用した。放射伝熱モデルには DOM<sup>11,12)</sup> (Discrete Ordinate Method) を用いて放射伝熱方程式 (RTE: Radiation Transfer Equation) を解き、放射によるエネルギー生成を算出した。今回の数値解析では、乱流モデルとして広く利用されている標準  $k-\epsilon$  2 方程式モデル<sup>13)</sup> と高圧場では乱流の非等方性が増大するという結果から、その点を考慮可能なモデルとしてレイノルズ応力モデル<sup>14)</sup> (RSM) を使用した。

今回解析対象とするメタン-酸素燃焼火炎においては、化学反応は十分に速く、燃焼は流体の混合問題に簡略化されると考えられるため、燃焼モデルとして混合分率法<sup>15)</sup> (以降、PDF モデル) を採用した。今回の解析では、PDF 形状として  $\beta$  関数を仮定して計算を実行した。また、あらかじめ20種の化学種を考慮して、ルックアップテーブルを作成した。

また、非平衡性を考慮するモデルとして Flamelet モデル<sup>16)</sup> で計算を行った。今回の計算では乱流における Flamelet を表す一般的な層流火炎として、対向流拡散火炎を使用した。あらかじめルックアップテーブルを作成する際の1次元対向流拡散火炎を用いた計算では詳細化学反応機構に  $\text{NO}_x$  関連反応を削除した GRI-Mech3.0 を採用し、34 個の化学種、219 個の素反応数を考慮した。

##### 4.2 計算領域

実験条件に合わせた計算領域を模式的に Fig. 7 に示す。解析対象は燃料ノズル中心軸に対して軸対称であるので2次元軸対称として、さらに炉内壁温度およびバーナ表面温度に関しては、各測定条件での測定中の平均温度を境界条件として計算を実行した。

#### 5. 解析結果及び考察

##### 5.1 非燃焼時の乱流モデルの比較

はじめに、非燃焼時について標準  $k-\epsilon$  2 方程式モデルと RSM の2つの乱流モデルの比較を行う。圧

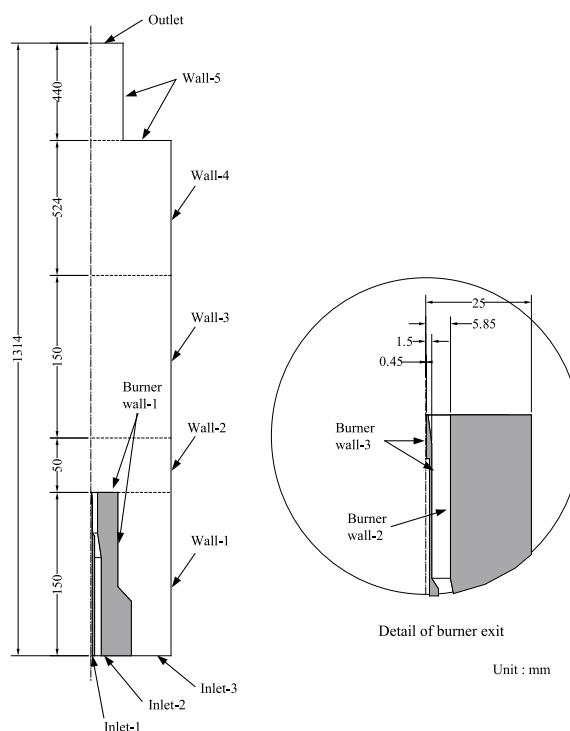


Fig. 7 Computational domain.

力は0.5, 0.7, 1.0 MPa の3条件について比較した。Fig. 8 に圧力0.5, 0.7, 1.0 MPa における軸方向平均流速の中心軸上分布を示す。まず乱流モデルの比較をすると、すべての圧力において RSM での計算値が大きな値となっている。次に計測値との比較をすると、圧力上昇とともに、RSM での計算値はすべての位置において計測値より大きな値を見積もるようになっていく。それに対して  $k-\epsilon$  モデルでは、高圧下での速度場をよく再現していることが確認できる。

##### 5.2 乱流燃焼モデルの比較

前項の2つの乱流モデルと、乱流燃焼モデルとして PDF モデルおよび Flamelet モデルの2つを組み合わせ、計4通りの計算を実施した。Fig. 9 に圧力0.5, 0.7, 1.0 MPa における軸方向平均流速の中心軸上分布を示す。はじめに、圧力0.5 MPa の場合をみると、乱流モデルの違いによらず、平衡を仮定した PDF モデルより、非平衡を考慮している Flamelet モデルの計算値が速度減衰を大きく見積もっていることが確認できる。しかしその差異も  $z/d=40\sim60$  程度でほとんどなくなり、計算値は同じ値を示すようになっていく。一方、乱流モデルによる計算値の差異は、乱流燃焼モデルによる差異よりも大きく、ノズル近傍  $z/d=5$  程度までを除いて、計測領域全体にわたって一致することはなかった。  $k-\epsilon$  モデルによる計算値よりも RSM の計算値は速度減衰を小さく予測しており、RSM と PDF モデルの組み合わせが計測値を最もよく

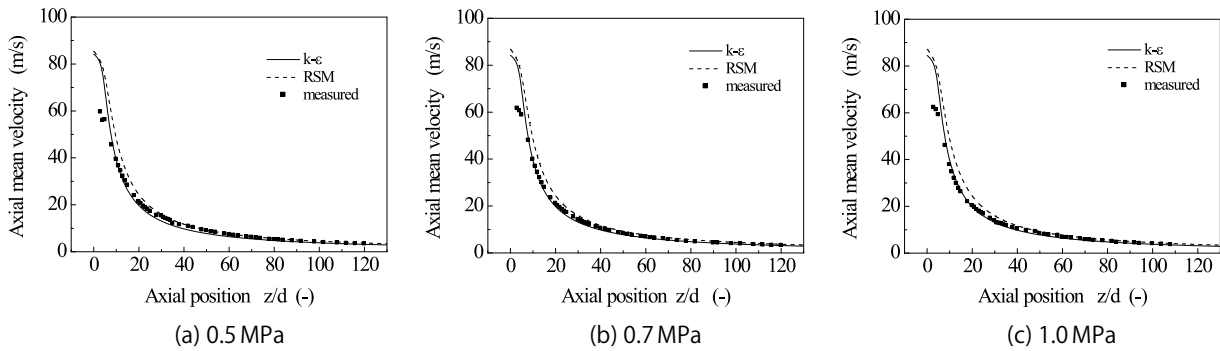


Fig. 8 Axial profiles of axial mean velocity on cold flow.

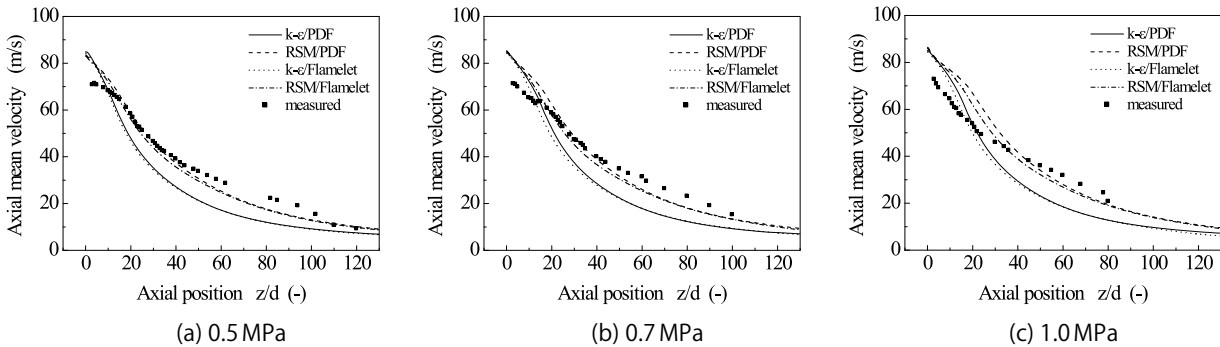


Fig. 9 Axial profiles of axial mean velocity on combustng flow.

再現していることが確認できる。圧力0.7 MPa の場合においても各モデル間の変化の傾向は圧力0.5 MPa の場合と同様であるが、4通りのすべての組み合わせにおいて、圧力上昇による速度減衰が小さくなる傾向を示している。特に乱流モデルの違いに関わらず、PDFモデルの変化が大きいことが確認できる。計測値はノズル近傍  $z/d=20$  程度までは圧力上昇によって速度減衰が大きくなる傾向を示していることから、計算値では逆の傾向を示す結果となった。圧力1.0 MPa では  $k-\epsilon$  モデルを組み合わせた2通りの計算値は圧力上昇によってほとんど変化がないのにも関わらず、RSMでの2通りの計算値は圧力0.7 MPa よりもさらに速度減衰を小さく見積もっており、乱流モデルの差異による影響が大きいことが確認できる。RSM の場合にはPDFモデル、Flameletモデルともに  $z/d=10\sim 30$  程度の範囲で圧力上昇による速度減衰が小さくなっており、この範囲での計測値との乖離は圧力0.7 MPa の場合よりさらに大きくなる結果となった。圧力上昇に伴う乱流場の非等方性の増大を確認していることから、これら乱流モデルの予測傾向の差異はモデル化の過程における等方性理論の採用に限界があることを示しているものと推測される。また、さらに火炎長が圧力変化によらず一定値を示す結果より、単位体積当たりの熱発生量の増加による温度変動ならびに密度変動の増大が引き起こされ、モデル化の過程において省略される高次相関項や密度変動に関係する項の影響が大きくなる

なる可能性を示唆しているものと推測される。

Fig. 10に圧力0.5, 0.7, 1.0 MPaにおける  $z/d=50$  での軸方向平均流速の半径方向分布を示す。すべての圧力において乱流モデル間の差異が特徴的に現れていることがわかる。特に中心部では  $k-\epsilon$  モデルの計算値がRSMに比較して75%程度の値となっており、 $k-\epsilon$  モデルの速度減衰は緩やかになっている。圧力0.5, 0.7 MPa ではRSMでの2つの組み合わせはともに計測値をよく再現しているが、圧力1.0 MPa では外端部での速度減衰を大きく予測しており、計測値と最大で25%程度の乖離があることが確認できる。

次に噴流の拡がり角を比較するために、半径方向の軸方向平均流速が中心最高流速の50%となる噴流半径を軸上位置との関係で表したものを、圧力ごとにFig. 11に示す。ここでも乱流モデルによる差異が乱流燃焼モデルによる影響より大きくなっている。また、非燃焼時と同様に  $k-\epsilon$  モデルよりもRSMでは噴流の拡がり角が抑制され、拡がり角が小さくなっていることが確認できる。さらに、乱流モデルの中でもPDFモデルの計算値の方がノズルから離れた位置では拡がり角が抑制される結果となっている。計測値との比較においては、圧力0.5, 0.7 MPa の場合にはすべての組み合わせにおいて拡がり角を大きく予測しているが、圧力1.0 MPa の場合にはRSMでの2つの計算値は計測値の傾向をよく再現していることが確認できる。

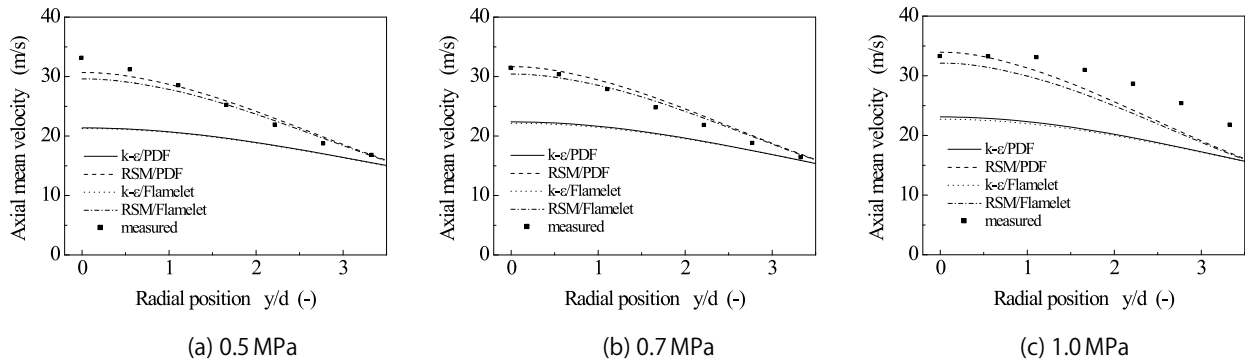


Fig. 10 Radial profiles of axial mean velocity on combusting flow at  $z/d = 50$ .

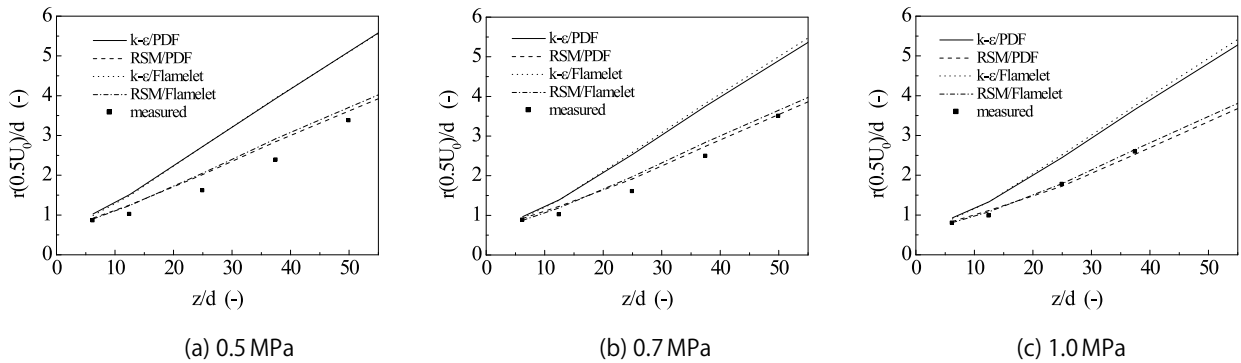


Fig. 11 Spreading angle comparison on combusting flow .

6. 結言

高圧下におけるメタン-酸素同軸乱流非予混合火炎の非燃焼時および燃焼時の流動場計測と数値シミュレーションを実施した。以下は得られた結論である。

- (1) 燃焼時には圧力上昇に伴い、平均流から乱流へのエネルギー移行が活性化され、乱流混合が促進される。
- (2) 燃焼時には圧力上昇に伴い、乱れの非等方向性が増大していく傾向が確認できた。
- (3) 非燃焼場においては  $k-\epsilon$  モデルが計測値と良い一致を示した。
- (4) 燃焼時における予測値は RSM/PDF の組み合わせが計測値と最も良い一致を示した。

参考文献

- 1) 飯野公夫, 近野直治, 讚井宏. 日本酸素技報. (13), 17-21 (1994).
- 2) 五十嵐弘, 阿部智信, 三宅新一, 鷲見郁宏, 菊池良輝. 日本酸素技報. (22), 7-12 (2003).
- 3) Eleazer, P. B. ; Slavejkov, A. G. *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 15 (2), 159-174 (1994).
- 4) Sautet, J. C. ; Salentey, L. ; DiTaranto, M. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 28 (2), 277-287 (2001).
- 5) Baukal, C. E. Jr. *Oxygen-enhanced combustion*. Florida, CRC Press, 1998, 369p.
- 6) Hottel, H. C. ; Hawthorne, W. R. *Proc. Combust. Inst.* 3, 254 (1949).
- 7) Devriendt, K. ; Van Look, H. ; Ceursters, B. ; Peeters, J. *Chem. Phys. Lett.* 261, 450-456 (1996).
- 8) Devriendt, K. ; Peeters, J. *J. Phys. Chem. A.* 101, 2546-2551 (1997).
- 9) 飯野公夫, 赤松史光, 香月正司. 高温学会誌. 31 (1), 38-44 (2005).
- 10) Sislian, J. P. ; Jiang, L. Y. ; Cusworth, R. A. *Prog. Energy Combust. Sci.* 14, 99-146 (1988).
- 11) Raithby, G. D. ; Chui, E. H. *J. Heat Transf.* 112, 415-423 (1990).
- 12) Chui, E. H. ; Raithby, G. D. *Numer. Heat Transf. Part B.* 23, 269-288 (1993).
- 13) Launder, B. E. *Int. J. Heat Mass Transf.* 15 (1), 301-306 (1972).
- 14) Gibson, M. M. ; Launder, B.E. *J. Fluid. Mech.* 86, 491-511 (1978).
- 15) Sivathanu, Y. R. ; Faeth, G. M. *Combust. Flame.* 82, 211-230 (1990).
- 16) Peters, N. *Prog. Energy Combust. Sci.* 10, 319-339(1984).