乱流予混合 V 型火炎の流体力学的構造

吉田 泰子^{*1}, 古川 純一^{*2}

Fluid-mechanical structure of a turbulent premixed V flame

Yasuko YOSHIDA^{*1} and Junichi FURUKAWA^{*2}^{*1,*2} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology
1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-Ku, Tokyo 140-0011, Japan

Received 17 March 2015

Abstract

The flow field of a turbulent premixed V flame has been closely examined by using a three-color six-beam LDV system. A bi-modal distribution, composed of the velocity fluctuations of both the high velocity mode and the low velocity mode, is observed within the turbulent flame brush. In the radial component, the high velocity mode is identified as velocity fluctuations of the unburnt mixture and the low velocity mode as velocity fluctuations of the burnt gas. On the other hand, in the axial component, the high velocity mode is identified as velocity fluctuations of the burnt gas and the low velocity mode as velocity fluctuations of the unburnt mixture. Velocity vectors of the unburnt mixture are seen to be directed toward outer side of the burner, indicating that the flow divergence is remarkable in the unburnt mixture. The radial component of the velocity vectors of the unburnt mixture increases in the downstream. On the other hand, the velocity vectors of the burnt gas are slightly directed towards the centerline because of the thermal expansion across the flamelet. The axial component of the velocity vectors of the burnt gas increases in the downstream. The RMS (root-mean-square) of the fluctuations of the radial component of the gas velocity decreases in the unburnt mixture towards the centerline. It increases in the turbulent flame brush. It decreases in the burnt gas toward the centerline. The RMS of the fluctuations of the axial component of the gas velocity decreases both in the unburnt mixture and the burnt gas toward the centerline. Enhancement of turbulence in the turbulent flame brush is remarkable in the radial direction.

Key words : Flame, Premixed combustion, Turbulence, V flame, Laser doppler velocimeter

1. 緒 論

乱流予混合火炎の構造や乱流燃焼速度は未燃焼混合気の乱流特性の影響を強く受け、火炎と流れの相互作用によって決まると考えられる(Peters, 2000). したがって、火炎と流れの相互作用を明らかにすることは、乱流予混合火炎における乱れの燃焼促進のメカニズムを解明する上で本質的な問題となる。火炎と流れの相互作用を解明するためには、乱流予混合火炎における火炎片の挙動と流れのようすを実験的に確かめなければならない。このような観点に基づき、静電探針を使用して乱流予混合火炎の火炎片の三次元挙動を計測する手法を確立し(古川他, 2006a), 乱流予混合 V 型火炎の火炎片の挙動(古川他, 2006b), 乱流予混合ブレンゼン火炎の火炎片の挙動(橋本他, 2007, 2008a, 2008b, 2008c, 2009), 乱流予混合ブレンゼン火炎における流れのようす(吉田他, 2014, 2015), さらに、火炎と流れの相互作用(野口他, 2012, 吉田他, 2012a, 2012b)などを系統的に調べた。

No.15-00144 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00144], J-STAGE Advance Publication date : 15 June, 2015

^{*1} 学生員, 東京都立産業技術高等専門学校専攻科 (〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)^{*2} 正員, 東京都立産業技術高等専門学校

E-mail of corresponding author: yasukoy.tmcit@gmail.com

先の研究（吉田他, 2014, 2015）では、層流燃焼速度と乱れの特徴が同一の条件で、燃料希薄側と過濃側のメタン・空気、プロパン・空気乱流予混合火炎の流れのようすを調べた。その結果、乱流火炎帯で記録されるガス流速の変動のバーナー半径方向成分には低速のモードと高速のモードから成る bi-modal な確率分布が観察されることが、bi-modal な確率分布から反応進行度数(reaction progress variable)を求めることができること、メタン火炎とプロパン火炎のガス流速のバーナー半径方向成分の燃焼ガスモードを比較すると、燃料過濃なプロパン・空気火炎で flow divergence が著しいこと、燃料希薄なプロパン・空気火炎で燃料分子と酸素分子の選択拡散の負の効果が観察されることが、などの新しい事実を明らかにした（吉田他, 2014, 2015）。

さらに、乱流予混合 V 型火炎の火炎片の挙動を調べた結果、V 型火炎では、乱流火炎帯の外側に未燃焼混合気が、乱流火炎帯の内側に燃焼ガスが存在する（Lewis and von Elbe, 1961）ために、火炎面の速度ベクトルは、それが燃焼ガス側から未燃焼混合気側に移動する場合より、未燃焼混合気側から燃焼ガス側に移動する場合の方が大きいこと、火炎面が未燃焼混合気側から燃焼ガス側に移動する場合、火炎面の速度ベクトルのバーナー軸方向成分は負になる場合があること、などの新しい事実を明らかにした（古川他, 2006b）。

乱流予混合 V 型火炎の流れのようすについては、Cheng and Ng（1983, 1984）の先駆的な研究が知られている。彼らは、2 ビームのレーザー流速計の流れに対し傾けて使用する巧みな手法で、ガス流速のバーナー軸方向および半径方向成分の計測をした。しかし、信号処理器の時間分解能が低いために、ガス流速のバーナー半径方向成分に未燃焼混合気と燃焼ガスの流速変動からなる bi-modal な確率分布を得るには至らず、乱流予混合 V 型火炎の流れのようすが十分明らかにされたとは言い難い。そこで、本研究では、乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用を明確にすることを目的とする研究の一環として、3 波長・6 ビームのレーザー流速計を使用して、乱流予混合 V 型火炎における流れのようすを詳しく調べた。

2. 実験装置および方法

本研究では、内径 26 mm の円管バーナーを使用した。V 型火炎を形成するために、バーナー中心軸上に直径 3.0 mm のステンレスの丸棒を垂直に、バーナー出口より 5mm 突き出して取り付けた。ステンレスの丸棒の先端に、図 1 に示すように、逆円錐型の火炎が形成される。燃料にはプロパンを使用し、混合気の当量比は 0.95、バーナー出口における混合気の流れを 4.0 m/s とした。この場合には、当量比が 0.95 以下では火炎は吹き飛んでしまい、また、当量比が 0.95 以上では火炎は円管バーナーのリムに付着し、V 型火炎は形成できない。

Fig. 1 Direct photograph of the Turbulent Premixed V Flame: The V flame is stabilized on a vertical stainless-steel rod 3.0 mm in diameter, extending downward to the bottom of the interior of the burner tube, and with its blunt end approximately 5 mm above the burner exist.

乱流火炎帯における流れのようすを調べるために、波長 491(出力 100mW)、532(出力 150mW)、および 561nm(出力 100mW)の 3 つの半導体レーザーを光源とする 3 波長・6 ビームの前方散乱方式のレーザー流速計システム(Artium LDV-300SC)を使用した。レーザー流速計の計測体積は、直径 0.2mm、長さ 2.2mm のフットボール状の形状をした 2 つの計測体積が垂直に交わった部分となるので、直径 0.2mm の球に近い形状である。レーザー流速計の散乱粒子は平均粒径が約 1 μ m の中空多孔質の二酸化ケイ素(SiO₂)を使用した。

バーナー出口中心を原点とするデカルト座標系において、図 1 に示すように、 x および y 軸を水平方向の座標 (y 軸は紙面に垂直方向)、 z 軸をバーナー中心軸方向の座標とした。なお、 x 方向 (バーナー半径方向) は、バーナー中心から外向きを正方向とし、 z 方向 (バーナー中心軸方向) は、保炎用のステンレス丸棒の先端の高さを $z=0$ mm とした。ガス流速の計測は、 x 方向 (バーナー半径方向) には $x=0$ mm から 1 mm ごとに 13 mm までの点、 y 方向 (バーナー接線方向) は $y=0$ mm、 z 方向 (バーナー軸方向) には $z=-5$ mm から 5 mm ごとに $z=35$ mm の高さまで行った。

3. 実験結果および考察

本研究で得られたガス流速のバーナー半径方向 (x 方向) 成分 V_x 、バーナー接線方向 (y 方向) 成分 V_y およびバーナー中心軸方向 (z 方向) 成分 V_z の変動の確率分布がバーナー半径方向に変化するように調べた結果を図 2 に示す。ここでは、保炎用のステンレス棒の先端からの高さが $z = 20$ mm の場合の結果を代表的な例として示した。本研究では、流れの中心とバーナー中心軸が若干ずれてしまったので、バーナー半径方向 (x 方向) とバーナー接線方向 (y 方向) 成分の平均値 $\bar{V}_x$ および $\bar{V}_y$ が $\bar{V}_x = \bar{V}_y \cong 0$ m/s となる座標を $x = y = 0$ mm と読み替えて報告する。ここで、 N はビン幅 0.04 m/s ごとの頻度であり、全サンプル数 N_s で正規化して示した。

ガス流速のバーナー半径方向 (x 方向) 成分 V_x の変動の確率分布は、計測点が $0 \text{ mm} \leq x < 5 \text{ mm}$ のとき、mono-modal な分布となる。計測点は燃焼ガス流中に存在すると考えられるので、このモードは燃焼ガス流速のモードである。ガス流速のバーナー半径方向成分 V_x の変動の確率分布は、計測点が $5 \text{ mm} \leq x \leq 9 \text{ mm}$ のとき、燃焼ガスの変動と考えられる低速のモードと未燃焼混合気の変動と考えられる高速のモードからなる bi-modal な分布となる。半径方向成分の変動の確率分布が bi-modal な分布となる領域は、乱流火炎帯である (吉田他, 2014)。この領域内で計測点がバーナー半径方向外側に移動すると、低速側の燃焼ガスモードのデータ数 N_b が減少し、高速側の未燃焼混合気モードのデータ数 N_u が増加する。ガス流速のバーナー半径方向成分 V_x の変動の確率分布は、計測点が $x > 9 \text{ mm}$ のとき、mono-modal な分布となる。計測点は未燃焼混合気流中に存在すると考えられるので、このモードは未燃焼混合気流速のモードである。

ガス流速のバーナー接線方向 (y 方向) 成分 V_y の変動の確率分布は、計測点が $0 \text{ mm} \leq x \leq 14 \text{ mm}$ のすべての範囲で、平均値 $\bar{V}_y = 0$ m/s および最頻値 0 m/s に対称な mono-modal な分布となる。計測点が乱流火炎帯内の時、ガス流速のバーナー接線方向成分 V_y の変動の確率分布は広い範囲に分布する。

ガス流速のバーナー軸方向 (z 方向) 成分 V_z の変動の確率分布は、計測点が $0 \text{ mm} \leq x < 5 \text{ mm}$ のとき、mono-modal な分布となる。計測点は燃焼ガス流中に存在すると考えられるので、このモードは燃焼ガス流速のモードである。ガス流速のバーナー軸方向成分 V_z の変動の確率分布は、計測点が $5 \text{ mm} \leq x \leq 6 \text{ mm}$ のとき、燃焼ガスの変動と考えられる高速のモードと未燃焼混合気の変動と考えられる低速のモードからなる bi-modal な分布となる。計測点がバーナー半径方向外側に移動すると、高速側の燃焼ガスモードのデータ数 N_b が減少し、低速側の未燃焼混合気モードのデータ数 N_u が増加する。計測点が $x > 6 \text{ mm}$ のとき、ガス流速のバーナー中心軸方向成分 V_z の変動の確率分布は、mono-modal な分布となる。計測点は未燃焼混合気流中に存在すると考えられるので、このモードは未燃焼混合気流速のモードである。バーナー軸方向成分では、半径方向成分とは異なり、高速側のモードは燃焼ガス流速の変動モードであり、低速側のモードは未燃焼混合気流速の変動モードである。バーナー軸方向成分の変動の確率分布に見られる bi-modal な分布は、半径方向成分の変動の確率分布に見られるそれに比べて、未燃焼混合気モードと燃焼ガスモードの境界が明確ではない。

ガス流速の半径方向成分では、燃焼ガス流速は低速のモードであり、未燃焼混合気流速は高速のモードであること、一方、バーナー軸方向成分では、燃焼ガス流速は高速のモードであり、未燃焼混合気流速は低速のモードであること、などが、本研究により明らかにされた新しい事実である (吉田他, 2014)。

乱流火炎帯の近傍でガス流速のバーナー半径方向とバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_x$ および $\bar{V}_z$ がバーナー半径方向に変化するように $z=0, 10, 20, 30$ mm の高さで調べた結果を図 3 に示す。ここで、ガス流速のバーナー半径方向成分 V_x は、bi-modal な分布における未燃焼混合気モードと燃焼ガスモードの境界が明確な場合、二つのモードの間で無次元データ数 N/N_s が極小となる流速を境界とし、それより流速の高い領域を未燃焼混合気モード、それより流速の低い領域を燃焼ガスモードとして、それぞれのモードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ および $\bar{V}_{xb}$ を計算した。しかし、ガ

Fig. 2 Change in the probability distributions of the velocity fluctuations of the radial (left), tangential (center) and axial (right) components at 20 mm height of the V flame: A bi-modality, composed of a low velocity mode of the burnt gas and a high velocity mode of the unburnt mixture, is observed in the probability distribution of the radial component in the turbulent flame brush. A bi-modality, composed of a high velocity mode of the burnt gas and a low velocity mode of the unburnt mixture, is observed in the probability distribution of the axial component in the turbulent flame brush. A bi-modality is not observed in the tangential component. A mono-modality, composed of the velocity fluctuations of the burnt mixture, is observed in both the radial and axial components in the inner side of the turbulent flame brush. A mono-modality, composed of the velocity fluctuations of the unburnt mixture, is observed in both the radial and axial components in the outer side of the turbulent flame brush.

Fig. 3 Radial distribution of the radial (left) and axial (right) components of the average gas velocity at 0, 10, 20 and 30 mm height (from bottom to top): Blue and red symbols represent the unburnt and burnt gas velocities, respectively: The radial component of the unburnt mixture velocity increases, maximum and decreases toward the centerline. It is maximum at the outer boundary of the turbulent flame brush. The radial component of the burnt gas velocity decreases, minimum and increases toward the centerline. Negative values are seen in the radial component of the burnt gas velocity, indicating that the burnt gas flow is directed toward the centerline because of the thermal expansion across the flamelet. The axial component increases from the outer side to the centerline. It also increases toward the downstream.

ス流速のバーナー軸方向成分は、bi-modal な分布における未燃焼混合気モードと燃焼ガスモードの境界が明確ではないために、各々のモードの平均値を求めることができなかった。

高さ $z = 0$ mmの場合：レーザー流速計では、厳密には、 $x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = 0$ mmの点の流速は計測できないため、計測点を下流方向に約 0.15mm 移動して、 $x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = 0.15$ mmの点で計測を行った。V 型火炎は、図 1 に示すように、保炎用のステンレス丸棒の先端に安定するために、この高さでは、半径方向全域で未燃焼混合気流速のみが検出される。未燃焼混合気流速のバーナー半径方向成分の平均値 $\bar{V}_{xu}$ は、半径方向外側から中心に向かって緩やかに増加し、 $x = 2$ mm付近で極大となり、減少する。未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ は、 $x = 3$ mm付近で極大となり、保炎用のステンレス丸棒およびバーナー壁近傍の剪断流領域で減少する。

高さ $z = 10$ mmの場合：ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ と燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ の分布は大きく異なる。未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ は上に凸な分布で、絶対値は燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ に比べて大きく、乱流火炎帯より外側で極大となる。一方、燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ は下に凸な分布で、絶対値は未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ に比べて小さく、乱流火炎帯より内側で極小となり、負の値も見られる。未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ は半径方向外側から中心に向かって増加する。燃焼ガス流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zb}$ は未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ に比べて若干大きい。

高さ $z = 20$ mmの場合：ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ は上に凸な分布で、絶対値は燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ に比べて大きく、乱流火炎帯より外側で極大となる。一方、燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ は下に凸な分布で、絶対値は未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ に比べて小さく、乱流火炎帯より内側で極小となり、負の値も見られる。燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ は中心近傍でゼロになる。これは、火炎片における発熱による熱膨張により、火炎全周から中心方向に大きな加速があるために、ガス流速の半径方向成分は互いに相殺するためと考えられる。未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ は、半径方向外側から中心に向かって増加する。燃焼ガス流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zb}$ は、未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ に比べて大きく、半径方向外側から中心に向かって増加する。

高さ $z = 30$ mmの場合：ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ は上に凸な分布で、絶対値は燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ に比べて大きく、乱流火炎帯より外側で極大となる。一方、燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ は下に凸な分布で、絶対値は未燃焼混合気モードの平均値 $\bar{V}_{xu}$ に比べて小さく、乱流火炎帯より内側で極小となり、負の値も見られる。燃焼ガスモードの平均値 $\bar{V}_{xb}$ は中心近傍でゼロになる。未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ は半径方向外側から中心に向かって増加する。燃焼ガス流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zb}$ は、未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_{zu}$ に比べて大きく、半径方向外側から中心に向かって増加する。

ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布が bi-modal な分布となる領域、すなわち乱流火炎帯は、下流方向に、半径方向外側に移動し、その厚さは増加する。

V 型火炎における流れのようすを明確にするために、図 3 に示した x - z 平面上の各計測点における半径方向成分及びバーナー軸方向成分の平均値 $\bar{V}_x$ および $\bar{V}_z$ に基づきガス流速ベクトル $\mathbf{V}_{xz}$ を描いたものを図 4 に示す。ここで、図中の青い矢印は未燃焼混合気の流れベクトル $\mathbf{V}_{xzu}$ 、赤い矢印は燃焼ガスの流れベクトル $\mathbf{V}_{xzb}$ を示している。未燃焼混合気の流れベクトル $\mathbf{V}_{xzu}$ は、バーナー外側に偏向して分布し、そのバーナー軸方向成分は、下流方向にあまり変化せず、バーナー半径方向成分は下流方向に増加する。バーナーを出た未燃焼混合気は、乱流火炎帯に沿うように、半径方向外側に偏向して上昇する。未燃焼混合気の流れは半径方向外側に加速されることがわかる。燃焼ガスの流れベクトル $\mathbf{V}_{xzb}$ は、若干ではあるが、バーナー中心に向かって分布し、バーナー軸方向成分は下流方向に増加する。そのバーナー半径方向成分は乱流火炎帯に入ると、火炎反応帯における発熱による熱膨張のために、流れはバーナー中心に向かって加速され、半径方向外側だった流れがバーナー中心向きに反転する。全周から中心に向かって加速されるため、互いに相殺し、バーナー中心でガス流速の半径方向成分はほぼゼロとなる。乱流火炎帯は、下流方向に、バーナー半径方向外側に移動し、その厚さは増加する。これが、本研究により明らかにされた新しい事実である。

Fig. 4 Vector distribution map of the average gas velocity on the x-z plane. Blue and red symbols represent the velocity vectors of the unburnt mixture and burnt gas, respectively: Velocity vectors of the unburnt mixture are seen to be directed toward outer side of the burner, indicating that the flow divergence is remarkable in the unburnt mixture. The radial component of the velocity vectors of the unburnt mixture increases in the downstream. On the other hand, the velocity vectors of the burnt gas are slightly directed towards the centerline because of the thermal expansion across the flamelet. The axial component of the velocity vectors of the burnt gas increases in the downstream.

乱流火炎帯の前後で乱れが変化するようにすを明確にするために、ガス流速の半径方向成分、接線方向成分およびバーナー軸方向成分の変動の RMS 値が半径方向に変化するようにすを $z=0, 10, 20, 30$ mm の高さで調べた結果を図 5 に示す。ここで、ガス流速の半径方向成分は、図 3 と同様に、bi-modal な分布における未燃焼混合気流速と燃焼ガス流速のモードの境界が明確な場合、二つのモードの間で無次元データ数 N/N_s が極小となる流速を境界とし、それより流速の高い領域を未燃焼混合気流速、それより流速の低い領域を燃焼ガス流速として、それぞれのモードの RMS 値 v'_{xu} および v'_{xb} を計算した。一方、接線方向成分の変動の確率分布は、平均値 $\bar{v}_y = 0$ m/s および最頻値 0 m/s に対称な mono-modal な分布となるために、未燃焼混合気および燃焼ガスのモードの RMS 値を求めることはできなかった。また、バーナー軸方向成分は、bi-modal な分布における未燃焼混合気モードと燃焼ガスモードの境界が明確ではないために、それぞれのモードの RMS 値を求めることはできなかった。

高さ $z = 0$ mm の場合: 先に述べたように、この高さでは、半径方向全域で未燃焼混合気流速のみが検出される。未燃焼混合気流速の半径方向成分と接線方向成分の速度変動の RMS 値 v'_{xu} および v'_{yu} はほとんど一定である。一方、未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の RMS 値 v'_z は、保炎用のステンレス丸棒およびバーナー壁近傍の剪断流領域で増加する。この領域では、バーナー軸方向成分の RMS 値 v'_z は、半径方向成分の RMS 値 v'_{xu} および接線方向成分の RMS 値 v'_{yu} に比べて大きく、乱れは非等方性である。

高さ $z = 10$ mm の場合: ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の未燃焼混合気モードの RMS 値 v'_{xu} は、バーナー外側から中心に向いて単調に減少する。一方、ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の燃焼ガスモードの RMS 値 v'_{xb} は、中心から外側に向かって、増加し、 $x = 2$ mm 付近で極大となり、減少する。 $x = 2$ mm 付

Fig. 5 Radial distribution of the root-mean-square fluctuations of the radial component (left) and tangential and axial components (right) of the gas velocity: Blue and red symbols represent the unburnt and burnt gas velocities, respectively: The RMS (root-mean-square) of the fluctuations of the radial component of the gas velocity decreases in the unburnt mixture towards the centerline. It increases in the turbulent flame brush. It decreases in the burnt gas toward the centerline. The RMS of the fluctuations of the axial component of the gas velocity decreases both in the unburnt mixture and the burnt gas toward the centerline. Enhancement of turbulence in the turbulent flame brush is remarkable in the radial direction.

近は、ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の燃焼ガスモードの平均値 $\bar{v}_{xb}$ の半径方向の勾配 $\partial\bar{v}_{xb}/\partial x$ が極大となる点である。未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の RMS 値 v'_{zu} および燃焼ガスのバーナー軸方向成分の RMS 値 v'_{zb} は、共に、バーナー外側から中心に向かって減少する。

高さ $z = 20 \text{ mm}$ の場合：ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の未燃焼混合気モードの RMS 値 v'_{xu} は、バーナー外側から中心に向いて、単調に減少する。一方、ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の燃焼ガスモードの RMS 値 v'_{xb} は、中心から外側に向かって、増加し、 $x = 5 \text{ mm}$ 付近で極大となり、減少する。 $x = 5 \text{ mm}$ 付近は、ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の燃焼ガスモードの平均値 $\bar{v}_{xb}$ の半径方向の勾配 $\partial\bar{v}_{xb}/\partial x$ が極大となる点である。未燃焼混合気流速のバーナー軸方向成分の RMS 値 v'_{zu} および燃焼ガスのバーナー軸方向成分の RMS 値 v'_{zb} は、共に、バーナー外側から中心に向かって減少する。

高さ $z = 30 \text{ mm}$ の場合：ガス流速の半径方向成分の変動の確率分布の未燃焼混合気モードの RMS 値 v'_{xu} は、バーナー外側から中心に向いて、単調に減少する。乱流火炎帯内では、未燃焼混合気モードの RMS 値 v'_{xu} に比べて、燃焼ガスモードの RMS 値 v'_{xb} が大きく、燃焼ガス流中で半径方向の乱れが増加することがわかる。燃焼ガス流中では、バーナー中心に向かい半径方向の乱れは減衰する。これは、火炎片における発熱による熱膨張のため火炎全周から中心に向かって流れが加速されるために、ガス流速の半径方向成分は互いに相殺し、流れの中心では水平方向の速度がゼロになるためと考えられる。燃焼ガス流速の接線方向成分の RMS 値 v'_{yb} も半径方向成分の燃焼ガスモードの RMS 値 v'_{xb} と同様である。このようすは $z = 30 \text{ mm}$ で顕著である。一方、バーナー軸方向成分の速度変動の RMS 値 v'_z は、未燃焼混合気の RMS 値 v'_{zu} および燃焼ガスの速度変動の RMS 値 v'_{zb} 共に、バーナー外側から中心に向かって減少する。燃焼ガス流速のバーナー軸方向成分の RMS 値 v'_{zb} は、半径方向成分と接線方向成分の RMS 値 v'_{xb} および v'_{yb} より大きく、乱れは非等方性である。

先に述べたように、V 型火炎の乱流火炎帯の厚さは下流方向に増加する。ブンゼン火炎の乱流火炎帯の厚さも下流方向に増加する。ブンゼン火炎では、乱れのスケールはバーナーリム近傍で小さく、それより内側では大きい。ブンゼン火炎で乱流火炎帯の厚さが下流方向に増加する理由を、バーナーリム近傍以外では乱れのスケールが大きいためと考えてきた。しかし、V 型火炎は、図 1 に示すように、逆円錐型の火炎が保炎用のステンレス丸棒の上に付着し、半径方向外側に広がっている。図 5 で明らかなように、乱れはバーナーの外側で最も強く、乱れのスケールは小さいと考えられる。乱流火炎帯の厚さを乱れのスケールで説明することは再考の余地がある。

4. 結 論

乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用を明確にすることを目的とする研究の一環として、3 波長・6 ビームのレーザー流速計を使用して、乱流予混合 V 型火炎における流れのようすを詳しく調べた。その結果、以下に述べるような新しい事実が明らかになった。

1) 乱流火炎帯で記録されるガス流速の半径方向成分とバーナー軸方向成分の変動の確率分布には、燃焼ガス流速のモードと未燃焼混合気流速のモードからなる bi-modal な分布が観察される。計測点がバーナー中心から半径方向外側に移動すると、燃焼ガス流速のモードのデータ数 N_b が減少し、未燃焼混合気流速のモードのデータ数 N_u が増加する。ガス流速の半径方向成分では、燃焼ガス流速のモードは低速側のモードであり、未燃焼混合気流速のモードは高速側のモードである。一方、ガス流速のバーナー軸方向成分では、燃焼ガス流速のモードは高速側のモードであり、未燃焼混合気流速のモードは低速側のモードである。

2) バーナーを出た未燃焼混合気は、乱流火炎帯に沿うようにバーナー外側に偏向して上昇する。乱流火炎帯では、火炎反応帯における発熱による熱膨張のために、流れは火炎片における発熱による熱膨張のために、火炎全周からバーナー中心に向かって加速されるため、ガス流速の半径方向成分は半径方向外向きから中心向きに反転する。ガス流速の半径方向成分は互いに相殺し、流れの中心では半径方向の速度がゼロとなる。

3) ガス流速の半径方向の乱れは、バーナー外側から中心に向かって、未燃焼混合気流中では減少し、乱流火炎帯内では増加し、燃焼ガス流中では減少する。一方、ガス流速のバーナー軸方向の乱れは、バーナー外側から中心に向かって減少する。乱流火炎帯内では、燃焼ガス流中で半径方向の乱れが増加する。

今後は、乱流火炎帯におけるレイノルズ応力の計測を行い、Bunsen 火炎と V 型火炎の乱れの生成のメカニズムを明らかにする予定である。

文 献

- Cheng, R. K. and Ng, T. T., Velocity statistics in premixed turbulent flames. *Combustion and Flame* 52 (1983), pp. 185-202.
- Cheng, R. K. and Ng, T. T., On defining the turbulent burning velocity in premixed V-shaped turbulent flames. *Combustion and Flame* 57 (1984), pp.155-167.
- 古川純一, 野口佳樹, Williams F. A., 乱流予混合火炎における火炎面の挙動とガス流速, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.69, No.680 (2003), pp. 962-967.
- 古川純一, 橋本英樹, Williams F. A., 乱流予混合 V 型火炎の火炎面の挙動, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.72, No.721 (2006), pp. 2279-2285.
- 橋本英樹, 古川純一, 岡本京子, Williams F. A., プロパン・空気乱流予混合火炎の火炎片の三次元挙動 (第 1 報, パーナー中心軸上における火炎片の挙動), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.73, No.735 (2007), pp. 2375-2380.
- 橋本英樹, 古川純一, 岡本京子, Williams F. A., プロパン・空気乱流予混合火炎の火炎片の三次元挙動 (第 2 報, off-axis における火炎片の挙動), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.74, No.740 (2008a), pp. 936-941.
- 橋本英樹, 古川純一, Williams F. A., プロパン・空気乱流予混合火炎の火炎片の三次元挙動 (第 3 報, 希薄, 過濃混合気における火炎片の挙動), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.74, No.740 (2008b), pp.942-948.
- 橋本英樹, 宋 明良, 富山明男, 古川純一, Williams F. A., 希薄および過濃なメタン・空気, プロパン・空気乱流予混合火炎の火炎片の挙動, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.74, No.744 (2008c), pp. 1835-1842.
- 橋本英樹, 谷本 隆, 古川純一, Williams F. A., 乱流予混合火炎で観察される選択拡散の痕跡, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.75, No.756 (2009), pp. 1685-1690.
- Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion Flames and Explosion of Gases*, 2nd Ed (1961), p.272, Academic Press.
- 野口佳樹, 吉田泰子, 古川純一, Williams F. A., 乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用 (火炎片の前後におけるガス流速の変化), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.791 (2012), pp. 1336-1344.
- Peters, N., *Turbulent Combustion* (2000), pp. 66-169, Cambridge University Press.
- 吉田泰子, 古川純一, 野口佳樹, Amin V. and Williams F. A., 乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用 (火炎片の流体力学的構造), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.795 (2012a), pp. 1967-1975.
- 吉田泰子, 古川純一, 野口佳樹, Williams, F. A., 乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用 (火炎片背後におけるガス流動), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.794 (2012b), pp. 1822-1831.
- 吉田泰子, 古川純一, Williams, F. A., 乱流予混合火炎における Flow Divergence, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.820 (2014), DOI : 10.1299-transjsme, 2014tep0375
- 吉田泰子, 古川純一, Williams, F. A., メタン・空気, プロパン・空気乱流予混合火炎の流体力学的構造, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.825 (2015), DOI : 10.1299/transjsme.14-00693.

References

- Cheng, R. K. and Ng, T. T., Velocity statistics in premixed turbulent flames. *Combustion and Flame* 52 (1983), pp. 185-202.
- Cheng, R. K. and Ng, T. T., On defining the turbulent burning velocity in premixed V-shaped turbulent flames. *Combustion and Flame* 57 (1984), pp.155-167.
- Furukawa, J., Noguchi, Y. and Williams, F. A., Effect of flame front movement on local flow in turbulent premixed flames. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.680 (2003), pp. 962-967 (in Japanese).
- Furukawa, J., Hashimoto, H. and Williams, F. A., Movement of flame fronts in a turbulent premixed V flame. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.721 (2006), pp. 2279-2285 (in Japanese).
- Hashimoto, H., Furukawa, J., Okamoto, K. and Williams, F. A., 3-D movement of flame fronts in a propane-air turbulent premixed flame (Part 1, flame-front movement on the centerline), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.735 (2007), pp. 2375-2380 (in Japanese).
- Hashimoto, H., Furukawa, J., Okamoto, K. and Williams, F. A., 3-D movement of flame fronts in a propane-air turbulent premixed flame (Part 2, flame-front movement at the off-axis), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.74, No.740 (2008a), pp. 936-941 (in Japanese).

- Hashimoto, H., Furukawa, J. and Williams, F. A., 3-D movement of flame fronts in a propane-air turbulent premixed flame (Part 3, flame-front movement in lean and rich mixtures), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.74, No.740 (2008b), pp.942-948 (in Japanese).
- Hashimoto, H., Sou, A., Tomiyama, A., Furukawa, J. and Williams, F. A., Flamelet movements in lean and rich methane-air and propane-air turbulent premixed flames, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.74, No.744 (2008c), pp. 1835-1842 (in Japanese).
- Hashimoto, H., Tanimoto, R., Furukawa, J. and Williams, F. A., Traces of preferential diffusion observed in turbulent premixed flames, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.75, No.756 (2009), pp. 1685-1690 (in Japanese).
- Lewis, B. and von Elbe, G., Combustion Flames and Explosion of Gases, 2nd Ed (1961), p.272, Academic Press.
- Noguchi, Y., Yoshida Y., Furukawa, J. and Williams, F. A., Flame-flow interaction in a turbulent premixed flame (change in gas velocity across the flamelet in turbulent premixed flame) , Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.78, No.791 (2012), pp. 1336-1344 (in Japanese).
- Peters, N., Turbulent Combustion (2000), pp. 66-169, Cambridge University Press.
- Yoshida, Y., Furukawa, J., Noguchi, Y., Amin, V. and Williams, F. A., Flame-flow interaction in a turbulent premixed flame (fluid mechanical structure of the flamelet) , Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.78, No.795 (2012a), pp. 1967-1975 (in Japanese).
- Yoshida, Y., Furukawa, J., Noguchi, Y. and Williams, F. A., Flame-flow interaction in a turbulent premixed flame (evolution of gas velocity behind the flame fronts) , Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.78, No.794 (2012b), pp. 1822-1831 (in Japanese).
- Yoshida, Y., Furukawa, J., and Williams, F. A., Flow divergence in turbulent premixed flames, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.820 (2014), DOI : 10.1299-transjsme, 2014tep0375.
- Yoshida, Y., Furukawa, J. and Williams, F. A., Fluid-mechanical structure of methane-air and propane-air turbulent premixed flames, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.825 (2015), DOI : 10.1299/transjsme.14-00693.