乱流予混合火炎の火炎面の挙動が局所的なガス流速におよぼす影響*

古川 純一^{*1}, 野口 佳樹^{*2}, Forman A. WILLIAMS^{*3}Effect of Flame Front Movement on Local Flow in
Turbulent Premixed FlamesJunichi FURUKAWA^{*4}, Yoshiki NOGUCHI and Forman A. WILLIAMS^{*4} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan College of Technology,
1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-0011 Japan

An attempt has been made to examine the flame-flow interaction in turbulent premixed flames in a reaction-sheet regime. Vectors of the flame-front movement and gas velocity have been measured simultaneously by use of a two-color, four-beam LDV system and a three-element electrostatic probe at two positions in a turbulent flame brush, i. e., on the centerline and off axis. Change of gas velocity across the flame front differs whether the flame front passes in the unburnt-to-burnt or burnt-to-unburnt direction. When the flame front passes in the burnt-to-unburnt direction, the normal component of the gas velocity to the flame front decreases across the flame front, while the parallel component does not change across the flame front. On the other hand, when the flame front passes in the unburnt-to-burnt direction, the normal component of gas velocity decreases across the flame front. The parallel component increases in the opposite direction to that of the flame front movement.

Key Words: Turbulence, Flame, Premixed Combustion, Flame Structure, Laser Doppler Velocimeter, Electrostatic Probe, Flame Flow Interaction

1 結 論 火炎反応帯における発熱に起因する熱膨張は、層流予混合火炎では既に良く知られているが⁽¹⁾, 乱流予混合火炎における乱れの増幅の要因であると考えられている⁽²⁾。したがって、乱流予混合火炎において乱れが増幅される現象を解明するためには、火炎面の

局所的な挙動とその前後において流れが変化するようにすを明らかにすることが重要であると考えられる。しかし、火炎面の挙動とその前後でガス流速が変化するようにすを詳細に計測することの困難さゆえ、乱流予混合火炎における乱れの増幅作用には未解決の部分が多く残されている。これまでに、静電探針とレーザ流速計を組み合わせ使用することにより火炎面の挙動とその前後でガス流速が変化するようにすを計測し、その現象の解明に取り組んできた⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。

確かに、先の研究⁽³⁾⁻⁽⁷⁾では、乱流予混合火炎における乱れの増幅に関する多くの新たな事実を明らかにしたが、それらの多くは火炎面の挙動、火炎面の前後において乱れ強さおよびそれらに対応するパワースペクトル

* 原稿受付 2002年7月4日。

^{*1} 正員, 東京都立工業高等専門学校(〒140-0011 東京都品川区東大井1-10-40)。^{*2} 正員, 龍谷大学理工学部(〒520-2194 大津市瀬田大江町1-5)。^{*3} University of California, San Diego, (9500 Gilman Dr., La Jolla, CA 92093-0411, USA)。

E-mail: furukawa@tokyo-tmct.ac.jp

密度関数などの統計的量が変化するように限られていた。統計的な結果は、瞬時、瞬時の現象の積み重ねであり、瞬時の現象を詳細に明らかにすることにより、統計的な結果が得られるメカニズムを解明することができるはずである。

そこで本研究では、乱流予混合火炎の火炎面の前後で流れが変化するように詳しく調べることににより、乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用を明らかにし、乱流予混合火炎における乱れの増幅作用を明らかにすることを試みた。

2 実験装置および方法 本研究で使用した乱流火炎バーナおよび静電探針とレーザ流速計を使用して火炎面の挙動とその前後でガス流速が変化するように計測する手法などは、先の研究^{(3)~(6)}と同一である。それらの詳細については、先の研究^{(3)~(6)}において既に詳しく報告してあるので、ここでは省略する。

燃料にはプロパンを使用し、混合気の当量比は 0.80, 1.10, 1.40, バーナ出口における未燃焼混合気の平均流速は 4.0 m/s とした。

Table 1 Summary of experimental conditions

ϕ	1.10		0.80, 1.40	
S_L (m/s)	0.41		0.27	
Position	A	B	A	B
z (mm)	48	24	64	32
r (mm)	0	9	0	10
U (m/s)	4.5	3.9	4.5	3.7
u' (m/s)	0.22	0.38	0.22	0.41
L_x (mm)	10.9	12.9	10.9	13.7
λ_x (mm)	3.5	2.3	3.5	2.0
η (μ m)	260	160	260	140

計測点の位置およびそこにおける非燃焼時の乱れの特性を表 1⁽⁵⁾ に示す。ここで、 z および r は、それぞれ、計測点のバーナ出口から鉛直上方および中心軸から半径方向の距離、 ϕ は当量比、 S_L は層流燃焼速度、 U は平均流速、 u' は乱れ強さ、 L_x は積分スケール、 λ_x はマイクロスケール、 η は Kolmogorov スケールである。

3 実験結果および考察 火炎面の挙動とその前後でガス流速が時間的に変化するようすを計測する場合、火炎面が計測点を通過しイオン電流が記録され、なおかつ火炎面の上流側と下流側で速度信号がいくつか記録されて、はじめて火炎面の挙動とその前後におけるガス流速の時間的な変化が同時計測できたことになる。とこ

ろが、これらの現象が同時に起きる頻度は極めて低く、記録されたデータは、火炎面が計測点を通過してもそこに散乱粒子が存在せず速度信号が記録されていなかったり、速度信号が記録されても火炎面が計測点を通過していない場合がほとんどであり、計測は困難を極めた^{(4), (5)}。

先に述べたように、本研究では、混合気の当量比が 0.80, 1.10, 1.40 の場合について実験を行った。それらの結果を調べると、混合気の濃度が変化しても、大きな差異は見られなかった。そこで、本研究では、代表的な例として、混合気の当量比が 1.10 の場合について報告する。

バーナ中心軸上の計測点 A において、ガス流速が変化するように調べた結果について述べる。未燃焼混合気流中においてガス流速が時間とともに変化するようすの代表的な例を図 1 に示す。ここでは、図の原点を計測点とし、計測点を基点とした矢印でガス流速のベクトルを表した。ガス流速のベクトルにはその時間的な変化がわかるように数字をつけて示した。すなわち、ガス流速は時間の経過とともに、①, ②, ③, ⑤, ④の順序に変化した。それぞれの速度ベクトルの時間間隔は、一定ではない。未燃焼混合気流中では、ガス流速のバーナ半径方向成分、軸方向成分ともに変動はわずかである。ガス流速のベクトルは、バーナ中心軸の近傍に分布する。

燃焼ガス流中においてガス流速が時間とともに変化するようすの代表的な例を図 2 に示す。燃焼ガス流中では、ガス流速のバーナ半径方向成分が減少し、バーナ軸方向成分が増加する。これは、後述するように、火炎面の前後で、ガス流速のバーナ半径方向成分は、一旦、火炎面が通過した方向とは反対方向に増加し、その後、減少するためである。この場合、火炎面は計測点をこの図の右上の方向に通過し、火炎面背後の燃焼ガス中で、ガ

Fig. 1 Change of gas velocity in the unburnt mixture on the centerline

ス流速のバーナ半径方向成分はこの図の左方向に増加した。その後、燃焼ガス中では、浮力の影響で、流れが上向きに加速されるために、ガス流速のバーナ半径方向成分が減少し、バーナ軸方向成分が増加する。

Fig. 2 Change of gas velocity in the burnt gas on the centerline

Fig. 3 Change of gas velocity across the flame front when the flame front passes in the burnt-to-unburnt direction

未燃焼混合気流中でガス流速が変化するようすは不規則であるが、燃焼ガス流中でガス流速が変化するようすには方向性があることがわかった。

火炎面が計測点を燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する際に、火炎面の前後でガス流速が変化するようすの代表的な例を図3に示す。ここでは、火炎面の速度ベクトルは V_f で示した。

この場合、火炎面は計測点を、ガス流速のベクトル①と②の間で、この図の左上の方向に通過した。火炎面の通過に伴い、ガス流速のバーナ軸方向成分および半径方

向成分が減少する。火炎面が計測点を燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する場合には、図4に示すように、燃焼ガスは火炎面の上方に存在するために、熱膨張は上向に起きる。したがって、燃焼ガス流中のガス流速のベクトルのバーナ軸方向成分は未燃焼混合気流中のそれよりも大きくなる⁽⁶⁾。ガス流速のバーナ半径方向成分は、火炎面が通過した方向とは反対方向に変化する。

Fig. 4 Direction of gas expansion when the flame front passes in the burnt-to-unburnt direction

火炎面の前後で流れが変化するようすを明確にするために、ガス流速のベクトルの火炎面に垂直方向および平行方向成分がどのように変化するかを調べた結果を図4に示す。ベクトル①の終点とベクトル②の終点を結んだベクトルは、火炎面にほぼ垂直である。火炎面の前後で、ガス流速のベクトルの火炎面に平行方向成分はほとんど変化せず、垂直方向成分のみが変化する⁽³⁾⁽⁴⁾ことがわかる。ベクトル②からベクトル④の間では、ガス流速はほとんど変化しない。

一方、火炎面が計測点を未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する際に、火炎面の前後でガス流速が変化するようすの代表的な例を図5に示す。この場合、火炎面は計測点を、ガス流速のベクトル①と②の間で、この図の左上の方向に通過した。火炎面の通過に伴い、ガス流速のバーナ軸方向成分は減少し、バーナ半径方向成分は、火炎面が通過した方向とは反対方向に増加する。

火炎面の前後で流れが変化するようすを明確にするために、ガス流速のベクトルの火炎面に垂直方向および平行方向成分がどのように変化するかを調べた結果を図6に示す。ベクトル①の終点とベクトル②の終点を結

んだベクトルは、火炎面にほぼ垂直であり、火炎面の前後で、ガス流速の火炎面に平行方向成分はほとんど変化せず、垂直方向成分が変化することがわかる。ところが、速度ベクトル②の終点と速度ベクトル③、④、⑥の終点を結んだベクトルは、火炎面にほぼ平行であり、ベクトル②からベクトル⑥の間では、ガス流速の火炎面に垂直方向成分はほとんど変化せず、平行方向成分が変化する。すなわち、火炎面の前後では、流れは火炎面に垂直方向に加速され、火炎面の背後の燃焼ガス中では、流れは火炎面に平行方向に加速されることを示している。これは、先の研究⁽⁶⁾で指摘したように、火炎面が計測点を未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する場合には、図6に示すように、火炎面の前後で熱膨張は下向きに生じ、軽い

Fig. 5 Change of gas velocity across the flame front when the flame front passes in the unburnt-to-burnt direction on the centerline

Fig. 6 Direction of gas expansion when the flame front passes in the unburnt-to-burnt direction

流体（燃焼ガス）は重い流体（未燃焼混合気）より下にあり、流れは不安定になる。さらに、火炎面が水平面に対して傾いているために、浮力の影響で、流れは火炎面に沿って加速される。したがって、火炎面背後の燃焼ガス中では、ガス流速の火炎面に平行方向成分が変化する。火炎面から離れた場所では、図2に示したように、流れはほぼ上向きに加速されるために、ガス流速のバーナ半径方向成分は減少し、軸方向成分は増加する。

これまでの研究⁽³⁾⁽⁴⁾では、火炎面の前後でガス流速は火炎面に垂直方向のみに変化するとされていた。これらの研究⁽³⁾⁽⁴⁾では、火炎面が未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過したのか、あるいは燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過したのか、また、火炎面の前後でガス流速が時間的に変化するようすなどについては、注意が払われなかったためである。

火炎面が燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する場合と未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する場合とでは、火炎面の前後でガス流速が変化するようすは大きく異なり、後者の場合には、火炎面の近傍では、浮力が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

バーナ中心軸から離れた計測点Bにおいて、ガス流速が変化するようすを調べた結果について述べる。

未燃焼混合気流中において、ガス流速が時間とともに変化するようすの代表的な例を図7に示す。

未燃焼混合気流中では、バーナ中心軸上の計測点Aにおけると同様に、ガス流速のバーナ半径方向成分、軸方向成分ともに変動はわずかである。ガス流速のベクトルは、バーナの中心から外側に分布する。バーナ中心軸から離れた場所では、ガス流速のベクトルは未燃焼混合気中においてもバーナ中心軸から外側に分布する。これは、イオン電流が未燃焼混合気側で増加を開始する点は、予熱帯の前縁より下流の反応帯の未燃焼混合気側の境界に近く、既に温度上昇を開始しているためであると考えられる⁽⁵⁾。

燃焼ガス流中において、ガス流速が時間とともに変化するようすの代表的な例を図8に示す。

燃焼ガス流中では、ガス流速のバーナ軸方向成分は若干増加し、半径方向成分は減少するために、ガス流速のベクトルが分布する位置は、バーナ中心軸から離れた場所からバーナ中心軸よりに変化する。

この場合、火炎面は、バーナ中心軸に向かって通過し、ガス流速のバーナ半径方向成分は増加した。その後、図8に示す燃焼ガス流中では、浮力の影響で、流れが上向きに加速されるために、ガス流速のバーナ半径方向成分が減少し、軸方向成分が増加する。

Fig. 7 Change of gas velocity in the unburnt gas at the off axis

Fig. 9 Change of gas velocity across the flame front when the flame front passes in the burnt-to-unburnt direction at the off axis

Fig. 8 Change of gas velocity in the burnt gas at the off axis

Fig. 10 Change of gas velocity across the flame front when the flame front passes in the unburnt-to-burnt direction at the off axis

バーナ中心軸から離れた計測点Bにおいても、未燃焼混合気流中でガス流速が変化するように不規則であるが、燃焼ガス流中でガス流速が変化するように方向性があることがわかった。

火炎面が計測点を燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する際に、火炎面の前後でガス流速が変化するように代表的な例を図9に示す。先の研究⁶⁾で報告したように、バーナ中心軸から離れた場所では、火炎面が未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する場合には、火炎面はほとんどの場合バーナの中心に向かって移動し、一方、火炎面が燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する場合には、火炎面はほとんどの場合バーナの外側に向かって移動する。

この場合、火炎面は計測点を、ガス流速のベクトル①と②の間で、燃焼ガス側から未燃焼混合気側に、バーナの外側に向かって通過した。ベクトル①の終点と

ベクトル②の終点を結んだベクトルは、火炎面にほぼ垂直である。火炎面の前後で、ガス流速の火炎面に平行成分はほとんど変化せず、垂直方向成分のみが変化することがわかる。

一方、火炎面が計測点を未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する際に、火炎面の前後でガス流速が変化するように代表的な例を図10に示す。この場合、火炎面は計測点を、ガス流速のベクトル①と②の間で、未燃焼混合気側から燃焼ガス側に、バーナの中心に向かって通過した。ベクトル①の終点とベクトル②の終点を結んだベクトルは、火炎面にほぼ垂直で、ガス流速の火炎面に平行方向成分はほとんど変化せず、垂直方向成分のみが

変化することがわかる。ベクトル②からベクトル③にかけて、ガス流速の火炎面に垂直方向成分は減少し、平行方向成分は火炎面が通過した方向とは反対方向に増加する。ベクトル③からベクトル④にかけて、ガス流速の火炎面に平行方向成分のみが変化する。ベクトル④からベクトル⑤にかけては、流れが上向きに加速されるために、ガス流速のバーナ中心軸方向成分が増加する。

図10により、流れは、1) 火炎面の前後で、火炎面に垂直方向に変化し、2) 火炎面の背後の燃焼ガス中で、火炎面に平行方向に変化し、3) 火炎面から少し離れたところで、鉛直上方向に変化することがよくわかる。

火炎面における熱膨張は火炎面に垂直方向に起きる。したがって、火炎面の前後でガス流速は火炎面に垂直方向に変化する。火炎面が通過すると、それが計測点を未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過するのか、あるいは、燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過するのかわかりなく、ガス流速の火炎面に垂直方向成分は減少する⁶⁾。火炎面が燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する場合には、熱膨張は上向きに起きるために、流れは安定となり、ガス流速の火炎面に平行方向成分はほとんど変化しない。ところが、火炎面が未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する場合には、熱膨張が下向きに起きるために、軽い流体(燃焼ガス)は重い流体(未燃焼混合気)より下にあり、流れは不安定となり、火炎面に沿って流れが加速される。このために、火炎面の前後では、ガス流速の火炎面に垂直方向成分が変化し、火炎面背後の燃焼ガス中では、ガス流速の火炎面に平行方向成分が変化する。火炎面から離れた場所では、流れが上向きに加速されるため、ガス流速のバーナ半径方向成分が減少し、軸方向成分が増加する。

これまで、乱流予混合バーナ火炎では、慣性力が支配的で、浮力の影響は無視し得ると考えられてきた。ところが、本研究により、火炎面が未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する場合には、浮力が重要な役割を果たすことが明らかになった。乱流予混合火炎の火炎面は凹凸のある、近似的には正弦波のような、形状をしており、それが水平方向に小さく変動しながら、垂直下流方向に移動するために、火炎面は計測点を、燃焼ガス側から未燃焼混合気側および未燃焼混合気側から燃焼ガス側に交互に通過する。したがって、乱流火炎帯内の任意の点では、火炎面がそれを通過する方向によって、流体力学的に安定な場と不安定な場が交互に生じていると考えられる。

4 結 論 乱流予混合火炎における乱れの増幅作用を解明することを目的として、火炎面の前後で流

れが変化するように詳しく調べた。その結果、以下に示すような結論を得た。

1) 火炎面の前後でガス流速が変化するように、火炎面が燃焼ガス側から未燃焼混合気側に通過する場合と、未燃焼混合気側から燃焼ガス側に通過する場合で、大きく異なる。

2) 前者の場合には、火炎面の前後で、ガス流速は火炎面に垂直方向に変化する。

3) 後者の場合には、火炎面の前後で、ガス流速は火炎面に垂直方向に変化する。火炎面背後の燃焼ガス中では、浮力の影響により、ガス流速は火炎面に平行方向に変化する。

本研究の一部は、文部科学省・科学研究費補助金(課題番号、基盤C 10650230)および日本学術振興会・日米科学協力事業の助成により行った。本研究へのForman A. Williamsの参加はNSF(NSF INT 9815204)の助成によるものである。

本研究のデータ解析には、東京都立工業高等専門学校学生、嶋倉圭一、沢田晴由、の諸君にご協力いただいた。また、レーザ流速計の計測に際し、山下雅雄氏をはじめとする日本カノマックス会社諸氏にご協力を頂いた。二酸化ケイ素の入手に際し、日本シリカ工業会社、多原光治氏にご配慮を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) Lewis B., and von Elbe G, "Combustion, Flames and Explosion of Gases", 3rd edition (1987) pp. 226-305, Academic Press
- 2) Karlovitz B., ほか3名, Proc. Combust. Institute 4 (1953), 613-620
- 3) 古川純一、平野敏右、燃焼の科学と技術、6 (1999)、95-103
- 4) 野口佳樹、ほか4名、機論、67-658B (2001), 1508-1515
- 5) Furukawa J., ほか3名、J. Fluid Mech. 462 (2002), 209-243
- 6) 古川純一、ほか2名、機論、69-680B (2003), 962-967