

メタン・空気乱流予混合火炎の 局所的な形状の計測に関する基礎的研究

— 1993年6月18日受理 —

古川 純一* 岡本 京子†

1 緒 論

乱流予混合火炎の局所的な反応帯の厚さは、乱れが極めて強い場合でも、層流予混合火炎と同様であることが明らかにされた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。これは、乱流予混合火炎の局所的な反応帯の内部構造が層流予混合火炎のそれと等しいことを示唆していると考えられる。そのような場合には、乱流予混合火炎の局所的な反応帯の形状の未燃焼混合気流中の乱れの諸特性への依存性を明らかにする事が、乱れの燃焼促進のメカニズムを明らかにするうえで本質的な問題となる。乱流予混合火炎の局所的な反応帯の形状を表す代表的な値である火炎面の凹凸のスケールは、混合気の乱れの特性のみならず、予混合火炎の流体力学的不安定性やセル状不安定性にも依存するという結果が得られている⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾。乱流予混合火炎の火炎面の凹凸のスケールがセル状不安定性に依存するならば、混合気の濃度や、使用する燃料の分子量に依存するはずである。

このような観点から、乱流火炎帯で計測されるイオン電流波形を解析して、プロパン・空気乱流予混合火炎の火炎面の曲率半径の混合気の濃度への依存性を調べた⁽¹⁰⁾。その結果、火炎面の曲率半径は過濃混合気では小さく、希薄混合気では大きくなることが明らかにされた。これ

は、火炎面の凹凸のスケールがセル状不安定性に依存していることを示唆していると考えられる。乱流予混合火炎の火炎面の凹凸のスケールのセル状不安定性への依存性をより一層明確にするためには、プロパンとは分子量の異なる燃料を使用した場合の乱流予混合火炎の火炎面の曲率半径を調べることが必要である。

ところが、従来の研究⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁵⁾で明らかにされたイオン電流波形の特性は、プロパン・空気予混合火炎の局所的な挙動や形状に関するものがほとんどであり、イオン電流波形を解析して、プロパン以外の燃料を用いた場合の乱流予混合火炎の火炎面の曲率半径を調べるために十分な基礎的な知識が得られたとは言い難い。

そこで本研究では、イオン電流波形を解析して、メタン・空気乱流予混合火炎の火炎面の凹凸のスケールを調べる場合の基礎的な知識を蓄積する目的で、メタン・空気予混合火炎におけるイオン電流波形の特性値の混合気の濃度および火炎の挙動への依存性を調べた。

2 実験装置および方法

乱流火炎のように変動している火炎を静止している静電探針により計測する場合、それを通過する火炎の挙動や形状を自由に設定すること

*東京都立工業高等専門学校

†上智大学大学院

はできない。しかし、定常・定在火炎を用い、それに対して静電探針を動かせば、静電探針に対する火炎の相対的な挙動や火炎の形状を自由に設定することができる⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。そこで、本研究では、層流バーナ火炎を用い、それに対して静電探針を動かすことにより、静電探針の火炎に対する相対的な挙動を任意に制御し、実験を行った。

静電探針の構造、それを動かすための回転装置、イオン電流の検出回路、イオン電流の記録装置などは先の研究⁽¹³⁾で使用したものと同じであるので、その詳細についてはここでは省略する。

本研究では、出口径 10 mm のノズルバーナおよび 8 mm × 50 mm の長方形の出口のノズルバーナを使用した。これらのバーナを使用することにより、円すい形あるいは二次元性のよい、変動のない安定な火炎が得られる。

燃料として、メタンおよびプロパンを使用し、混合気の濃度は、当量比 $\phi = 0.9 \sim 1.4$ の場合について実験を行った。

静電探針の受感部の長さ L_p を $L_p = 1.0$ mm とし、静電探針の受感部が火炎を通過する際の速度 V_p を $V_p = 0.6 \sim 4.0$ m/s、静電探針の受感部の軸と火炎面のなす角度 α を $\alpha = 0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で変化させた。

イオン電流波形は、12-bit の分解能で A-D 変換し、128-kbyte のメモリに収録した後、32-bit のパーソナルコンピュータにより解析した。

3 実験結果および考察

イオン電流波形の形状を表す代表的な特性値として、その極大値 j_m と半値幅 t_h がある。メタン・空気予混合火炎において記録されるイオン電流波形の極大値および半値幅の混合気の濃度への依存性はプロパン・空気予混合火炎の場合と異なるのか、また異なるとすればそれはどの程度かを明らかにするために、これらの特性

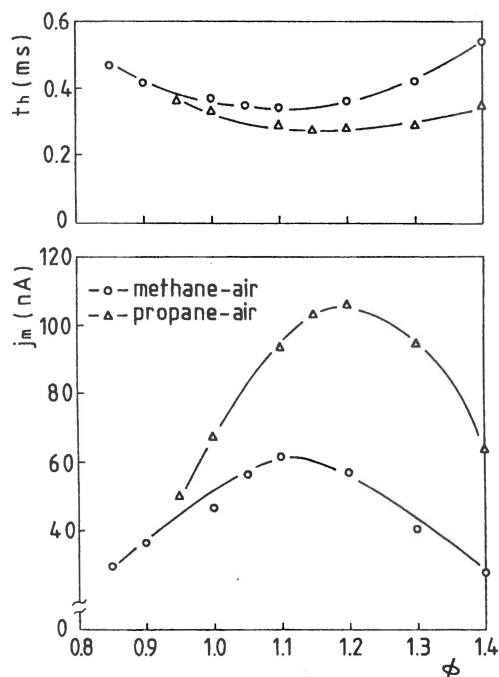


Figure 1 Dependence of the characteristics of ion current on mixture ratio ($V_p = 3$ m/s, $\alpha = 0^\circ$).

値の混合気の濃度への依存性を調べ、プロパン・空気予混合火炎の場合と比較した結果を図 1 に示す。メタン・空気予混合火炎、プロパン・空気予混合火炎ともに、当量比 $\phi = 1.1$ 付近で、イオン電流波形の極大値は最大となり、半値幅は最小となる。プロパン・空気予混合火炎に比べ、メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の極大値は小さく、半値幅は大きい。

一般に、イオン電流波形の極大値は反応帯におけるイオン濃度に、半値幅は反応帯の厚さに比例すると考えられる^{(4),(16)}。そこで、火炎の特性とイオン電流の関係を明らかにするために、式 (1) で表される、静電探針により記録されるイオンの量 Q の混合気の濃度への依存性を調べてみた。その結果を図 2 に示す。ここで、 $j(t)$ は静電探針により記録されるイオン電流、 t は

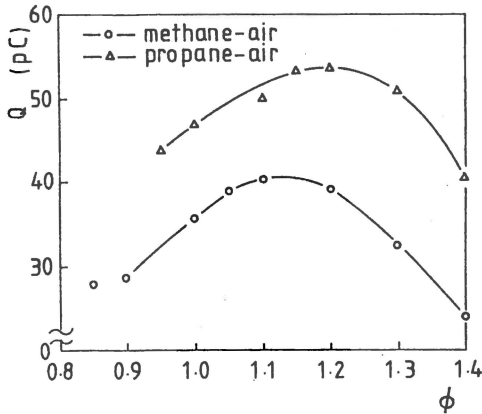


Figure 2 Dependence of the amount of ion on mixture ratio ($V_p = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$).

時間である。

$$Q = \int j(t) dt \quad (1)$$

なお、式 (1) の計算は、数値積分を行った。

静電探針により記録されるイオンの量 Q は、メタン・空気予混合火炎、プロパン・空気予混合火炎ともに当量比 $\phi = 1.1$ 付近で最大となる。プロパン・空気予混合火炎の場合に比べ、メタン・空気予混合火炎のイオンの量 Q は全般的に小さい。火炎反応帯において生成されるイオンの量は、混合気中に含まれる炭素原子数に比例すると考えられるので、この結果は妥当であるといえる。すなわち、当量比が等しい場合、単位体積のメタン・空気混合気およびプロパン・空気混合気中に含まれる炭素原子数の比は 1:1.3 であり、イオンの量 Q の比と一致する。

一方、出口径 10 mm のノズルバーナを使用して角度法により測定した層流燃焼速度から推定したメタン・空気層流予混合火炎の反応帯の厚さ⁽¹⁷⁾とイオン電流波形の半値幅を比較した結果を図 3 に示す。なお、図中の縦軸は反応帯の無次元厚さ δ/δ_0 および無次元半値幅 t_h/t_{h0} で示した。ここで、 δ_0 および t_{h0} は、当量比 $\phi = 1.0$ の場合の反応帯の厚さとイオン電流波形の半値幅である。イオン電流波形の無次元半値幅 t_h/t_{h0}

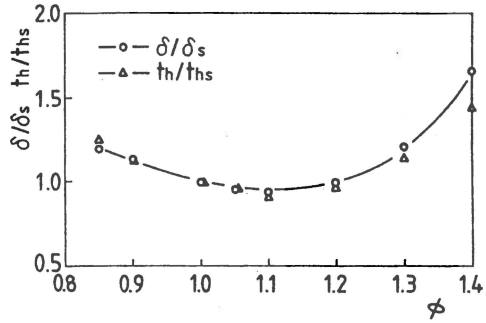


Figure 3 Comparison of the flame thickness and the half value period ($V_p = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$).

の混合気の濃度への依存性は、層流燃焼速度から求めた反応帯の無次元厚さ δ/δ_0 の混合気の濃度への依存性と極めてよく一致している。この結果は、混合気の濃度の変化に対するイオン電流波形の半値幅の変化の割合は、層流予混合火炎の反応帯の厚さの変化の割合に等しいことを示している。すなわち、層流予混合火炎の反応帯の厚さは 10^{-1} mm の程度⁽¹⁷⁾であるから、混合気の濃度の変化に起因する反応帯の厚さの変化は 10^{-2} mm の程度と考えられる。静電探針は、直接的に火炎反応帯の厚さを計測することはできないが、その変化の割合に比例した半値幅の変化の割合として検出することが可能であり、空間分解能が非常に優れた計測法であることを示している。プロパン・空気予混合火炎に比べて、メタン・空気予混合火炎の半値幅は大きく、極大値は小さい。メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の特性値の混合気の濃度への依存性は、プロパン・空気火炎の場合と同様であることがわかった。

前報^{(3),(10),(18),(19)}では、イオン電流波形の極大値 j_m の火炎が静電探針を通過する際の速度 V_f (実質上、本研究の V_p と同じ) および火炎面と静電探針の軸のなす角度 α への依存性に基づきイオン電流波形を解析することにより、乱流予混合火炎の火炎面の曲率半径を計測できることを示した。そこで、当量比 $\phi = 1.0$ の場合に、

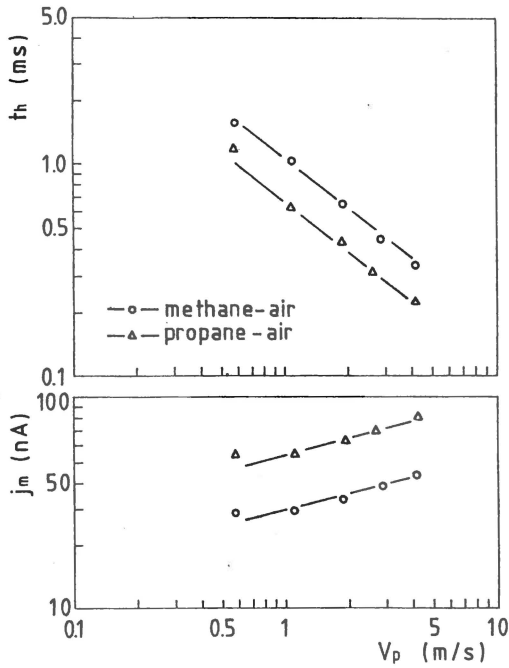


Figure 4 Dependence of the characteristics of ion current on the flame velocity ($\phi = 1.0$, $\alpha = 0^\circ$).

メタン・空気予混合火炎において記録されるイオン電流波形の特性値の火炎の挙動への依存性を調べ、プロパン・空気予混合火炎の場合と比較した。

イオン電流波形の特性値の静電探針の受感部が火炎を通過する際の速度 V_p への依存性を調べた結果を図 4 に示す。速度 V_p が増加すると、イオン電流波形の極大値 j_m は増加し、半値幅 t_h は減少する。メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の特性値の速度 V_p への依存性は、プロパン・空気予混合火炎と同様であることがわかった。

イオン電流波形の特性値の火炎面と静電探針の受感部の軸のなす角度 α への依存性を調べた結果を図 5 に示す。なお、図中の縦軸は、無次元極大値 j_m/j_{ms} および無次元半値幅 t_h/t_{hs} で

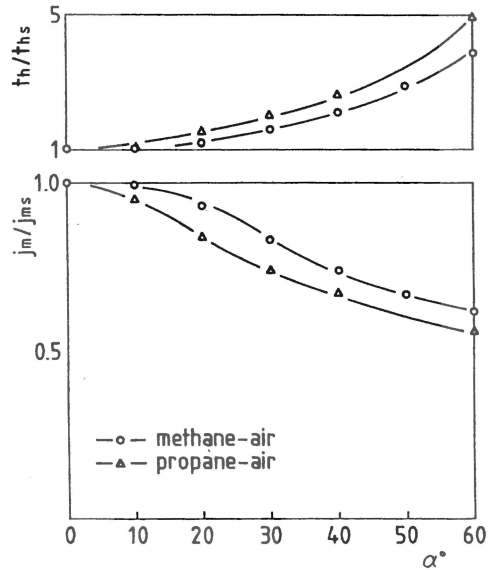


Figure 5 Dependence of the characteristics of ion current on the flame inclined angle ($\phi = 1.0$, $V_p = 3$ m/s).

示した。ここで、 j_{ms} および T_{hs} は、 $\alpha = 0^\circ$ の場合のイオン電流波形の極大値と半値幅である。角度 α が増加すると、イオン電流波形の無次元極大値は減少し、無次元半値幅は増加する。メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の特性値の角度 α への依存性は、プロパン・空気予混合火炎と同様であることがわかった。

プロパン・空気予混合火炎に比べて、メタン・空気予混合火炎の半値幅は大きく、極大値は小さい。しかし、メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の特性値の混合気濃度および火炎の挙動への依存性は、プロパン・空気予混合火炎の場合と同様であることが明らかになった。したがって、本研究で得られた特性に基づきイオン電流波形を解析すれば、メタン・空気乱流予混合火炎の局所的な反応帯の曲率半径を計測することが可能である。

4 結 論

メタン・空気乱流予混合火炎の火炎面の凹凸のスケールを調べる場合の基礎的な知識を蓄積することを目的として、メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の特性を調べ、プロパン・空気予混合火炎の場合と比較した結果、以下に述べるような結論を得た。

1. 当量比 $\phi = 1.1$ 付近で、イオン電流波形の極大値は最大となり、半値幅は最小となる。
2. 静電探針の受感部が火炎を通過する際、速度が増加すると、イオン電流波形の極大値は増加し、半値幅は減少する。
3. 静電探針の受感部の軸を火炎面のなす角度が増加すると、イオン電流波形の極大値は減少し、半値幅は増加する。
4. メタン・空気予混合火炎のイオン電流波形の特性値の混合気の濃度および火炎の挙動への依存性は、プロパン・空気予混合火炎の場合と同様である。
5. 本研究でえられた特性に基づきイオン電流波形を解析することにより、メタン・空気乱流予混合火炎の火炎面の凹凸のスケールを計測することが可能である。

本研究を行うにあたり東京都立工業高等専門学校学生、中村建二君に御協力いただいた。また、本研究で使用したノズルバーナの製作に際して日産自動車総合研究所、高木靖雄博士に御協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 古川純一, 原田栄一, 平野敏右, 日本機械学会論文集, 55-520B (1989), 3758.

- (2) Furukawa, J., Harada, E., and Hirano, T., Twentythird Symposium (International) on Combustion, (1990), 789.
- (3) Furukawa, J., Maruta, K., Nakamura, T., and Hirano, T., Combust. Science Technol., 90, (1993), 267.
- (4) 丸田薫, 古川純一, 五味努, 平野敏右, 日本機械学会論文集, (掲載予定).
- (5) Palm-Lewis, A. and Strehlow, R. A., Combust. Flame, 13, (1969), 111.
- (6) Yoshida, A., and Tsuji, H., Nineteenth Symposium (International) on Combustion, (1982), 403.
- (7) Yoshida, A., and Tsuji, H., Twentieth Symposium (International) on Combustion, (1984), 445.
- (8) 横野泰之, 五味努, 日本機械学会論文集, 52-473B, (1986), 208.
- (9) Tsuruda, T., and Hirano, T., Combust. Science Technol., 51, (1987), 323.
- (10) Furukawa, J., Maruta, K., Nakamura, T., and Hirano, T., Paper presented at Fourteenth International Colloquium of the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, (1993).
- (11) Suzuki, T., Hashimoto, Y., Mashiko, I., and Hirano, T., Combust. Flame, 36, (1979), 179.
- (12) 平野敏右, 鈴木鐸士, 橋本洋一, 益子一郎, 日本機械学会論文集, 46-405, (1980), 1007.
- (13) 古川純一, 丸田薫, 平野敏右, 日本機械学会論文集, 57-536B, (1991), 1463.

- (14) 古川純一, 中村朋宏, 五味努, 平野敏右, 日本機械学会論文集, 57-544B, (1991), 4272.
- (15) Furukawa, J., Maruta, K., Nakamura T., Gomi, T., and Hirano, T., JSME International Jour., (in press).
- (16) Maclatchy, C. S., Combust. Flame, 36, (1979), 171.
- (17) Willimas, F. A., Combustion Theory, 2nd Ed., (1985), Benjamin/Cummings, Calif., Chap. 5.
- (18) 古川純一, 中村朋宏, 平野敏右, 燃焼の科学と技術, 1-1, (1992), 51.
- (19) Furukawa, J., Nakamura, T., and Hirano, T., Combust. Science Technol., (in press).
-
-

Fundamental Study of the Measurements of the Flame Front Configuration of Methane-Air Turbulent Premixed Flames

Junichi Furukawa

Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan Technical College
and

Kyoko Okamoto

Department of Mechanical Engineering, Sophia University

In order to examine the wrinkle scale of methane-air turbulent premixed flames by using an electrostatic probe, the ion current characteristics of methane-air flame under various mixture ratios have been examined in detail. The half value period of ion current of methane-air flame is larger than that from propane-air flame. The maximum ion current and the amount of ion of methane-air flame are smaller than those of propane-air flame. The dependence of the ion current characteristics of methane-air flame on the mixture ratio and the flame movement is similar to that of propane-air flame. Therefore, the wrinkle scale of methane-air turbulent premixed flames can be predicted by analyzing the ion current record based on the knowledge obtained in the present study.