

## 濃度こう配を有する予混合気中を伝ばす火炎先端領域の特性\*

廣田光智<sup>\*1</sup>, 松尾亜紀子<sup>\*2</sup>, 溝本雅彦<sup>\*2</sup>Characteristics of Flame Propagation at Flame Base Region  
into Premixed Mixture with Concentration GradientMitsutomo HIROTA<sup>\*3</sup>, Akiko MATSUO and Masahiko MIZOMOTO<sup>\*3</sup> Keio University, Dept. of Mechanical Engineering,  
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8522 Japan

Characteristics of a triple flame generated with methane-air mixture are experimentally investigated in various fuel concentration gradients. The OH radical intensity, which obtained by the direct measurement using an interference filter, and the flame position are measured in each case. The flame position shows that the whole flame width between the both premixed flame wings is wider than the flammability limit width of the unburned mixture. The expanding ratio of this flame width rises by increasing the concentration gradient. The result of OH radical intensity indicates that the most active reaction region is at flame base. The heat value supplied in the flammability limit well explains the behavior at the flame base region. It is also clarified that, at the flame base, the diffusion flame is formed away from the stoichiometric premixed flame, and these flames interact each other.

**Key Words:** Diffusion Combustion, Premixed Combustion, Combustion Phenomena, Triple Flame, Concentration Gradient, OH radical, Flame Interaction

## 1. 緒 言

トリプルフレームは、図1のような燃料希薄予混合気から過濃予混合気へ幅広い濃度こう配が存在するとき、燃料希薄予混合火炎、燃料過濃予混合火炎、拡散火炎の3種類の火炎がいかり形に形成される特殊な火炎である。近年、この火炎の構造は乱流拡散火炎で存在する局所消炎の火炎端と類似している可能性があるとして、さまざまな研究<sup>(1)~(3)</sup>が行われてきた。しかしながら局所消炎の領域が非常に小さく複雑なこと、トリプルフレーム自身の構造が不明確であることなどにより、多くの課題を残している。本研究では、乱流拡散火炎における考慮すべき火炎要素の一つとしてトリプルフレームを取り上げ、まずこの火炎の定常状態の性質を実験的に解明することを試みる。

従来の研究では Phillips<sup>(4)</sup>によって研究されて以来、トリプルフレームはさまざまな立場で実験あるいは数値解析を用いた研究がなされている。可燃範囲内で燃料濃度こう配が存在する領域では、この火炎が形

成される可能性があるためである。したがって例えば噴流拡散火炎基部や境界層拡散火炎基部などにおいて、後流の拡散火炎の安定性に対して予混合的性質を考慮している場合は、この領域でのトリプルフレームの存在を示唆している。噴流バーナで浮上がり火炎が形成された場合は、トリプルフレームの存在が確認されており、Chung ら<sup>(5)~(9)</sup>によって数多くの研究がなされている。しかしながらバーナポートに付着した噴流拡散火炎基部では、トリプルフレームの存在は確認されておらず、Takahashi ら<sup>(10)</sup>が示した Reaction Kernel という反応の活発な領域が後流の安定性を維持していると考えることもできる。これには、濃度こう配の大きさの違いが影響していると考えられる。すなわち未燃の燃料と酸化剤が混合される距離、時間の長さにより濃度こう配の大きさが変化しており、これに熱損失などトリプルフレームとして形成できない条件が加わっていると考えられる。したがって濃度こう配の大きさを変化させて火炎の特性を解析することは非常に重要である。

またトリプルフレームは、性質の違う火炎同士が非常に近い位置に形成されており、3種類の火炎が枝分かれする先端部において相互に干渉していると考えられる。従来、Sohrab ら<sup>(11)</sup>によって対向流中に形成さ

\* 原稿受付 1999年9月29日。

<sup>\*1</sup> 慶應義塾大学大学院 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。<sup>\*2</sup> 正員、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: mizomoto@mech.keio.ac.jp

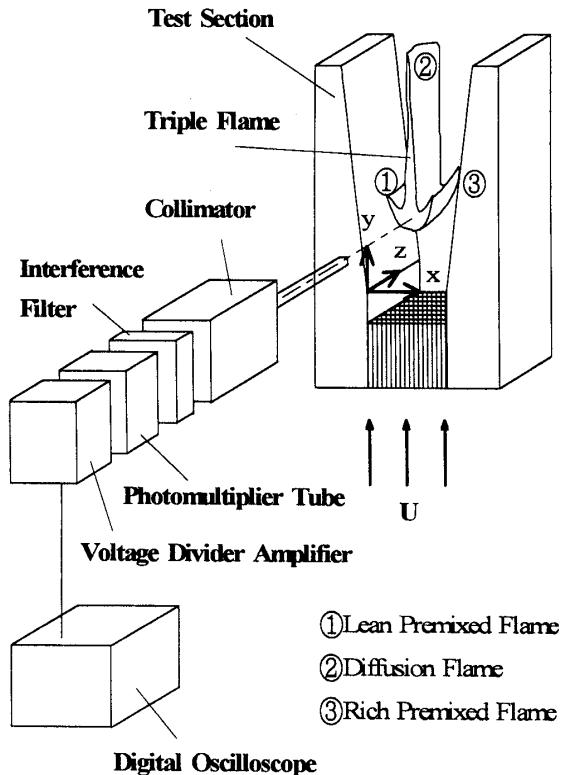


Fig. 1 Schematic diagram of a methane-air triple flame

れる希薄、過濃予混合火炎と拡散火炎からなる三重火炎において火炎間の相互干渉が検討されている。また対向流場を用いて拡散火炎から予混合火炎への移行が検討されている<sup>(12)</sup>。このときトリプルフレームにおいて詳細に検討が必要と思われる原因是、曲率をもった予混合火炎面と拡散火炎が共存する火炎先端領域における相互干渉である。なおこの部分は一般にトリプルポイントと呼ばれているが、予混合火炎面と拡散火炎先端が交差しているという明確なデータではなく、本研究ではあえて火炎先端領域と記述することとする。

このような背景から本研究では、燃料の濃度こう配を任意に設定して、トリプルフレームの予混合火炎面と拡散火炎との相互干渉のメカニズムを明らかにすることを目的とする。このとき特に、OHラジカル発光強度に着目した。OHラジカルは、燃焼反応において重要な役割を果たす連鎖分岐反応に必要不可欠なラジカルの一つであり、熱発生率との相関がある<sup>(13)</sup>など、重要なパラメータとなる。これを火炎の定在位置と照らし合せて、トリプルフレーム先端領域の特性を検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

本研究では、定在するトリプルフレームが四方を壁面で囲まれたテストセクション内

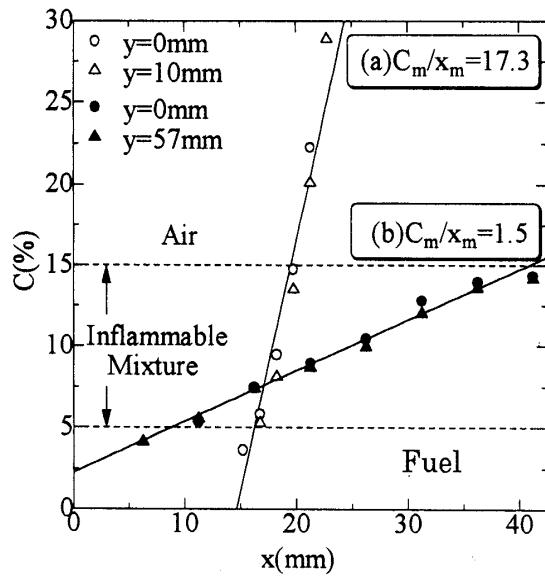


Fig. 2 Fuel concentration profile of unburned mixture

で二次元的に観察できるように、従来の研究<sup>(14)</sup>で用いられたものを参考に実験装置を作成した。燃料(メタン)と酸化剤(空気)は、任意に設定された濃度で各セクションごとにあらかじめ十分に混合され、6セクションからなる混合気流入室よりそれぞれ取り込まれる。ここで濃度分布が階段状に設定された同流速の混合気は、拡散室、整流室を通過して乱れのない直線状の濃度こう配を実現してテストセクションに導かれる。テストセクション入口はハニカムを設置した42.5 mm × 42.5 mm の矩形断面である。テストセクション入口から高さ 10 mm の断面を基準に両側壁面を外側に 4°開き、混合気中に伝ばす火炎を定在させる。図 1 に示すように座標系は、テストセクションのハニカム出口から 10 mm 下流の希薄側壁面が 4°に開き始める位置を原点として、濃度こう配方向に x 軸、下流方向に y 軸、奥行き方向に z 軸とする。なお速度分布については熱線流速計を用いて非燃焼時の混合気が乱れ強さ 1%以下、速度一様(主流流速 1.1 m/s)であることを確認している。

**2・2 濃度こう配の設定** 本研究において主流の濃度こう配は、混合気流入室に取り入れる混合気の濃度を変化させることにより任意に設定する。

図 2 はガスクロマトグラフによって測定された未燃時におけるテストセクション内の濃度分布の例である。キャリアガスとしてヘリウム、吸着剤は活性炭を用い、直径 0.51 mm のステンレス管を測定プローブとして等速吸引で測定した。縦軸は燃料濃度の体積分率、横軸は x 軸方向距離を表している。本研究では燃料としてメタンを使用しているので可燃範囲が 5%か

ら 15%である。図 2 より設定される濃度こう配は、急な状態(a), 緩やかな状態(b)にかかわらず、可燃範囲内では直線的な濃度分布が得られていることがわかる。各プロットは、○および●がテストセクション入口の  $y=0$  mm 地点での分布を、△および▲がその設定で実際に火炎が定在する高さでの未燃時の分布をそれぞれ表している(ただし,  $z=21.25$  mm)。二つのプロットを比較すると分布にほとんど違いがないことがわかる。したがって未燃状態では、設定した濃度こう配はテストセクション内でその大きさ、直線性を維持していると考えられる。

このようにして設定する濃度こう配の大きさを表す指標として、本研究では独自に無次元濃度こう配  $C_m/x_m$  を定義する。 $C_m$  は過濃可燃限界と希薄可燃限界の燃料濃度の差を理論混合比濃度で割った値、 $x_m$  は可燃範囲幅を装置幅で無次元化した値を表す。燃料としてメタン、酸化剤として空気を使用しているため  $C_m=1.06$  という一定値をとる。また可燃範囲幅は図 2 のようにガスクロマトグラフから測定された未燃時の濃度分布結果から求め、装置幅の  $L=42.5$  mm で無次元化して  $x_m$  を算出した。表 1 に設定した無次元濃度こう配を記す。この  $C_m/x_m$  の値が大きいほど濃度こう配が急な状態で設定されていることを表している。従来の研究では、各研究の特色上、テストセクションが囲まれているもの<sup>(14)~(16)</sup>、自由噴流のもの<sup>(17)(18)</sup>、定在するもの<sup>(14)(15)(17)(18)</sup>、浮上がり過程のもの<sup>(16)</sup>などさまざまな条件の違いがある。本研究で定義した無次元濃度こう配(横軸  $C_m/x_m$ )を用いることで従来の研究における濃度こう配の大きさを換算できる。換算した濃度こう配の傾きを比較すると、本研究の設定濃度こう配は、従来よりも緩やかで幅広い濃度設定を実現しており予混合火炎面と拡散火炎をはっきりとらえられることから、定在するトリプルフレームを詳細に観察するのに適している。

**2・3 実験方法** 本研究では、表 1 に示すような 9 種類の混合気の濃度こう配設定で観察されるトリプルフレームを対象に実験を行った。3 種類の火炎が共存するトリプルフレームにおいて、混合気の濃度こう配の違いにより反応への影響を検証するために、OH ラジカル発光強度を測定した。OH ラジカルは高温の領域で多く存在しており、この分布を知ることは火炎の特性を検討するうえで重要である。測定は光度計を用いて発光スペクトルを得る炎光法によって行った。図 1 に示すような自作のコリメータ(空間分解能 4 mm)を介して、発光スペクトルのうち対象としている面積のみの波長を取り込む。干渉フィルタを用いて取り込まれた波長のうち、OH ラジカル発光の最も強いピーク波長である 306.3 nm 付近のみを抽出した。この発光スペクトルは、光度計を通して、デジタルオシロスコープによってサンプリングを行った。この平均値を OH ラジカル発光強度として、テストセクション全域にわたって測定した。

### 3. 実験結果および考察

**3・1 火炎面位置** 測定された OH ラジカル発光強度分布から、濃度こう配の違いによる火炎位置の変化を検討した。生成される量が多く、反応に伴う発熱量が非常に大きい OH ラジカルは、燃焼反応において重要な役割を果たす。本研究ではこの分布が熱発生率を示し、さらに高温領域を予測できるものと考え、直接写真から読み取れる可視炎位置と比較して、火炎位置を決定した。

図 3 は測定された OH ラジカル発光強度分布の  $x$  方向断面を示したものである。測定された OH ラジカル発光強度分布のうち最大幅をとる高さ( $y$  方向)における  $x$  方向断面を示した。つまり、火炎先端領域において予混合火炎面の曲率がほぼなくなっている高さ

Table 1 Non-dimensional concentration gradient in this work

	Gentle Side	Steep Side
1.5	1.8	2.2
2.4	5.4	8.8
5.4	10.7	14.5
8.8	14.5	17.3

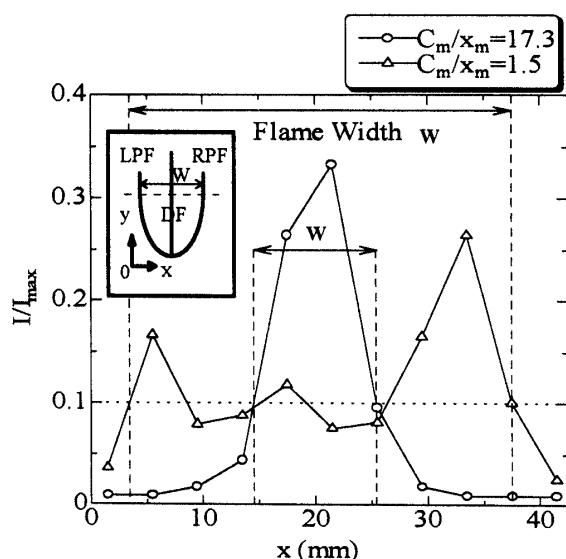


Fig. 3 Cross sectional luminous intensity profile of OH radical ( $x$  direction)

における $x$ 方向断面を示している。本研究ではこの高さにおいて火炎幅がほぼ最大となるとみなし、この高さよりも上流側の火炎を、火炎先端領域と考えている。縦軸はOHラジカル発光強度 $I/I_{\max}$ を表している。 $I$ は測定されるOHラジカル発光強度の電圧信号であり、これを今回測定した中での最大値となる $C_m/x_m=2.2$ のときの $x=21.5$ mm,  $y=72$ mmの位置における値 $I_{\max}=870$ mvで無次元化して $I/I_{\max}$ を求めた。横軸は $x$ 軸方向距離を表している。各プロットは、○が $C_m/x_m=17.3$ で濃度こう配が急な状態、△が $C_m/x_m=1.5$ で濃度こう配が緩やかな状態の結果である。図3より濃度こう配が急な状態では、OHラジカル発光強度のピーク値は $x=21.5$ mmに一つで、直接写真から測定される拡散火炎の可視火炎位置の延長線上(理論混合比軸線上にあたる)にあることを確認している。このとき予混合火炎位置付近にピーク値は現れていない。これは測定時の空間分解能の限界により、予混合火炎面としてのピークをとらえられないことが原因である。実際には濃度こう配が急なときは希薄、過濃予混合火炎は拡散火炎面に近い位置に形成され、二つの予混合火炎面間の距離も小さく、装置断面に対して火炎面の占める割合も小さい。

逆に濃度こう配が緩やかな状態では、OHラジカル発光強度のピーク値は三つあり、 $x=34.5$ mmの過濃側予混合火炎面付近のピーク値が最も高く、続いて $x=5.5$ mmの希薄側予混合火炎面付近、 $x=17.5$ mmの拡散火炎面付近の順にピーク値が現れている。直接写真から観察すると濃度こう配が緩やかなときは希薄、過濃予混合火炎面間の距離は大きく、装置断面に対して火炎面の占める割合も大きくなる。このとき拡散火炎の可視火炎位置延長線上(理論混合比軸線上)にあるOHラジカル発光強度のピーク値は $C_m/x_m=17.3$ のときの値よりも小さい。

この $x$ 方向断面において、濃度こう配の大きさが変わると拡散火炎の可視火炎位置延長線上(理論混合比軸線上)にあるOHラジカル発光強度の値が変化する現象は、測定断面位置(測定高さ)の違いが原因であると思われる。すなわち、濃度こう配が急なときは、火炎幅が最大となる高さはOHラジカル発光強度の最大値に近い後流側に位置している。逆に、濃度こう配が緩やかなときの火炎幅が最大となる高さは、濃度こう配が急なときよりもOHラジカル発光強度の最大値から後流側に離れている。後述する図7に示すように測定されるOHラジカル発光強度の最大値から後流側では、急激にその値が小さくなっている。したがってこの位置で測定されるOHラジカル発光強度が濃

度こう配の大きさの違いによって変化している結果となった。なお本研究では、このピーク値上の火炎を、拡散火炎の可視炎延長線上(理論混合比軸線上)の火炎といい、拡散火炎とは区別して考えている。この点については後にOHラジカル発光強度の $y$ 方向断面分布のところ(図7参照)で詳しく記述する。

本研究では、この測定結果を用いて可視炎位置と比較して火炎位置の決定をした。すなわち図3において $I/I_{\max}$ の値が0.1よりも高い値、発光強度の値が立ち上がる位置を火炎であると考え、 $x=0$ mmから過濃側に最初に $I/I_{\max}=0.1$ となる位置を希薄側予混合火炎位置、 $x=42.5$ mmから希薄側に最初に $I/I_{\max}=0.1$ となる位置を過濃予混合火炎位置とした。測定高さ( $y$ 方向)は図3と同様、OHラジカル発光強度分布のうち最大幅をとる高さである。各濃度こう配設定において同様の計測を行い、得られたものが図4である。縦軸は $x$ 軸方向距離、横軸は無次元濃度こう配を示している。各プロットは、○が希薄側予混合火炎面位置、△が過濃側予混合火炎面位置をそれぞれ表している。また直接写真から測定したもので□が希薄側予混合火炎面位置、▽が過濃側予混合火炎面位置を示している。これらのプロットはほぼ一致しており、OHラジカル発光強度から測定する火炎位置がほぼ可視炎部に当たることがわかる。比較のために図2で求められた未燃時の濃度分布を用いて可燃範囲を示した。●が希薄側可燃限界位置、▲が過濃側可燃限界位置である。図4より濃度こう配が急なときは可燃範囲幅が狭いため、火炎もテストセクション中心付近に形成されている。この濃度こう配が緩やかになると可燃範囲幅も

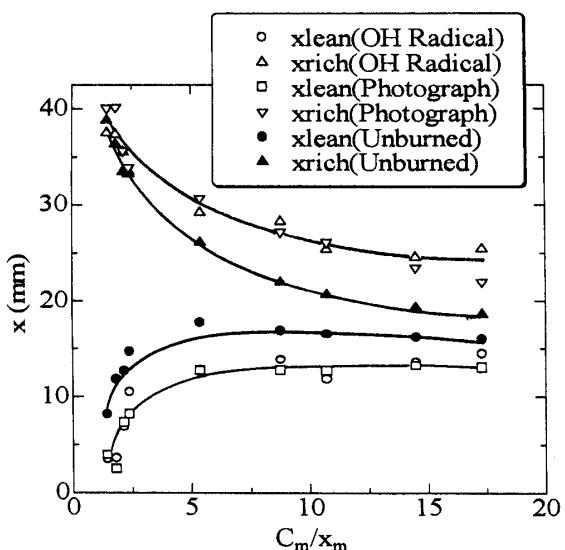


Fig. 4 Relation between non-dimensional concentration gradient and flame position

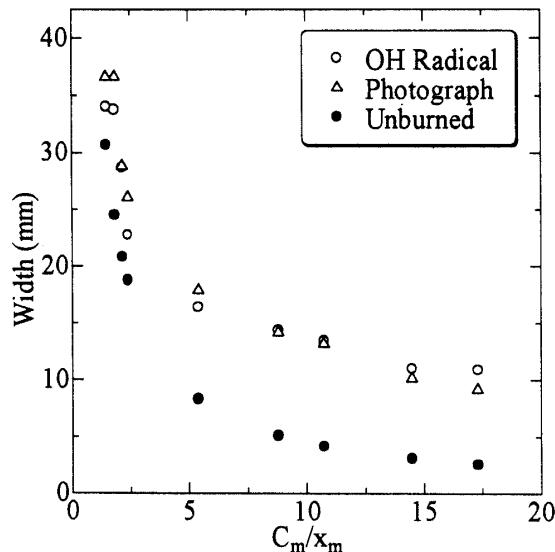


Fig. 5 Effect of non-dimensional concentration gradient on flame width

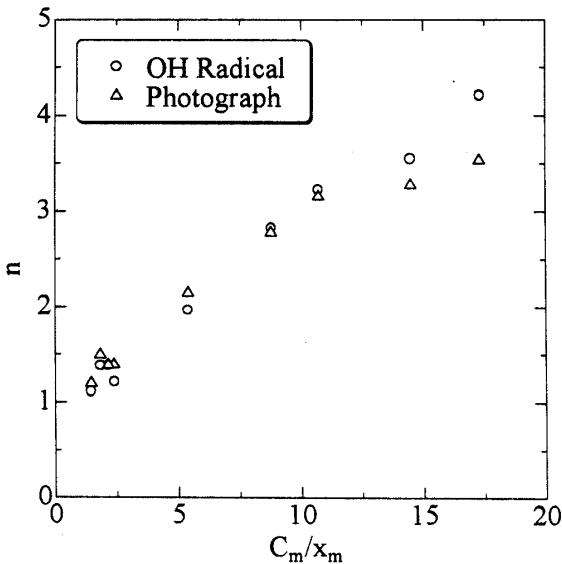
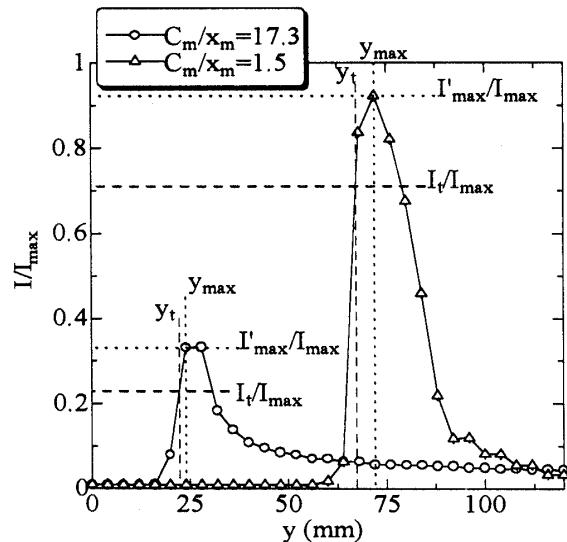


Fig. 6 Effect of non-dimensional concentration gradient on the expanding ratio of flammability limit width

徐々に大きくなり、火炎もテストセクション全域にわたって形成されてくることがわかる。

上記の火炎位置から火炎幅、未燃の濃度分布から可燃範囲幅について示したものが図5である。縦軸は測定される幅、横軸は無次元濃度こう配を表している。各プロットは、○がOH発光強度から得られる火炎幅、△が直接写真から得られる火炎幅、●が未燃時の可燃範囲幅を表している。図5より濃度こう配が急なときは火炎幅が10 mm程度で狭い。逆に濃度こう配が緩やかになると幅も徐々に大きくなる。この火炎幅は濃度こう配が  $C_m/x_m < 5$  から急激に広くなり、35 mm程度まで広がっている。未燃時の可燃範囲幅と

Fig. 7 Cross sectional luminous intensity profile of OH radical ( $y$  direction)

比べるとつねにこの幅よりも大きい値をとっているが、濃度こう配が緩やかになると幅が広がる傾向は、類似している。

図5で得られた火炎幅と未燃時の可燃範囲幅の関係を表すものとして、可燃範囲幅の拡大率  $n$  を図6に示す。縦軸は未燃時の可燃範囲幅を基準としたときの測定される火炎幅の比  $n$  を表したものである。本研究では既燃時の可燃範囲幅は火炎幅にあたるものとして未燃時との比をとり、可燃範囲幅の拡大率  $n$  と表している。各プロットは、○がOH発光強度から得られる火炎幅、△が直接写真から得られる火炎幅を表している。図6より、濃度こう配が急なときは可燃範囲幅は初期の設定よりも4倍程度大きくなる。濃度こう配が緩やかになると拡大率も比例して小さくなり、濃度こう配が零のときは拡大率も1になるような直線的な結果になっている。したがって初期の濃度こう配設定幅を基準とした火炎幅の拡大率は、こう配の大きさが大きくなるにつれて増えていることがわかる。従来の研究の速度場<sup>(7)(15)~(20)</sup>をみると、トリプルフレーム前縁において流れ場が押し曲げられ、火炎先端軸線上の速度が急激に減速することがわかる。本研究のようなトリプルフレームは、未燃混合気と火炎伝ば速度が釣り合ったときに定在する。拡大率が小さいということは流れ場がそれほど押し曲げられておらず、火炎先端においてあまり減速していないと考えられる。したがって  $n$  を考慮することによって濃度こう配の変化に対するトリプルフレーム自身の伝ば速度、つまり火炎先端において局所伝ば速度の変化の傾向を予測することができる。ただしトリプルフレームの伝ば速度については

詳細に定義した例はなく、今後検討の余地がある重要な課題の一つである。

図7は、OHラジカル発光強度分布のy方向断面を表している。これは測定されたOHラジカル発光強度分布のうち、火炎先端位置(理論混合比流線上にあたる)にx方向を固定しy方向に断面をとったものである。縦軸はOHラジカル発光強度 $I/I_{\max}$ 、横軸はy軸方向距離を示している。各プロットは、○が $C_m/x_m = 17.3$ のとき、△が $C_m/x_m = 1.5$ のときの分布を示している。図7中の破線は各濃度こう配設定中の火炎先端位置を、点線はOHラジカル発光強度最大値位置をそれぞれ示している。図7よりOHラジカル発光強度は火炎先端部で急激に上がり、火炎先端よりも後流で最大値をとる。この位置からさらに後流側でOHラジカル発光強度は急激に下がり、 $I/I_{\max} = 0.05$ に収束する。また測定されるOHラジカル発光強度の最大値は、濃度こう配が急な状態では小さく、逆に緩やかな場合は大きい値をとっている。図7において火炎先端位置にあるOHラジカル発光強度を $I_t/I_{\max}$ とし、このときのy方向位置を $y_t$ とする。またOHラジカル発光強度最大値を $I'_{\max}/I_{\max}$ とし、このときのy方向位置を $y_{\max}$ とする。図7より火炎先端からOHラジカル発光強度最大値位置まではある幅をもっていることがわかる。なお前述のように、x方向断面をとった予混合火炎幅が最大となる高さは、図7の $y_{\max}$ よりも後流側の $I/I_{\max}$ が減少しているところにあたる。図7においてOHラジカル発光強度の立ち上がる $y_t$ を予混合火炎面位置として $I/I_{\max} = 0.05$ に収束した部分を拡散火炎位置とすると、 $y_{\max}$ から後流側に $I/I_{\max}$ が

減少している部分は純粋な拡散火炎とは明らかに特性が違うものである。本研究では、この部分の火炎を純粋な拡散火炎とは区別してとらえ、通常の予混合火炎から純粋な拡散火炎へ移行する過程にあるいわゆる部分予混合火炎と考えた。

**3・2 火炎先端領域の特性** 図8は、濃度こう配の大きさが火炎先端領域のOHラジカル発光強度に及ぼす影響について示したものである。縦軸は測定されるOHラジカル発光強度 $I$ を今回測定した中での最大値 $I_{\max}$ で無次元化した値またはy方向距離を表し、横軸は無次元濃度こう配を示している。各プロットは、○が火炎先端のOHラジカル発光強度 $I_t$ を $I_{\max}$ で無次元化したもの、△が各設定濃度こう配中のOHラジカル発光強度最大値 $I'_{\max}$ を今回測定した中での最大値 $I_{\max}$ で無次元化したもの、□が測定したOHラジカル発光強度の最大値をとるy方向位置 $y_{\max}$ と火炎先端位置 $y_t$ との差である。これらの結果を用いて以下にトリプルフレームの火炎先端領域の特性を検討する。

図8の○プロットより濃度こう配が急なときは $I_t/I_{\max} = 0.25$ 程度で弱いが、濃度こう配が緩やかになると急激に強くなり $I_t/I_{\max} = 0.75$ と3倍程度大きくなる。この現象の考察には、燃焼した燃料の量を用いて検討する。すなわち未燃時の可燃範囲中に含まれる燃料の量を濃度こう配の違いによって比較したときに相対的に多ければ、燃焼は活発に起こっていると考えられる。よって設定した濃度こう配中の可燃範囲に含まれるメタンがすべて燃焼したとする仮定から換算できる火炎の推定最大発熱量を以下のように算出する。

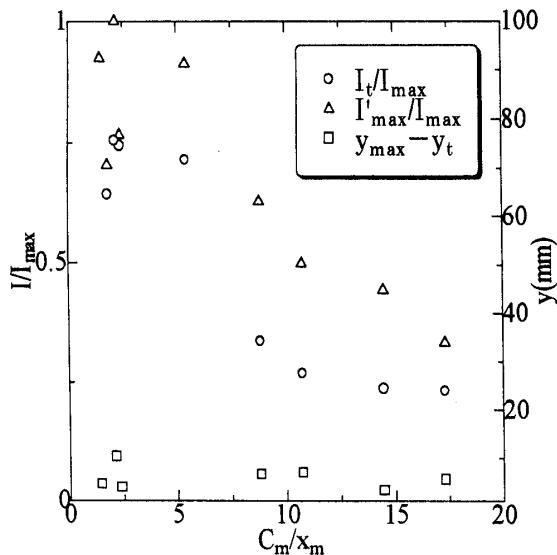


Fig. 8 Effect of non-dimensional concentration gradient on luminous intensity of OH radical at the flame base region

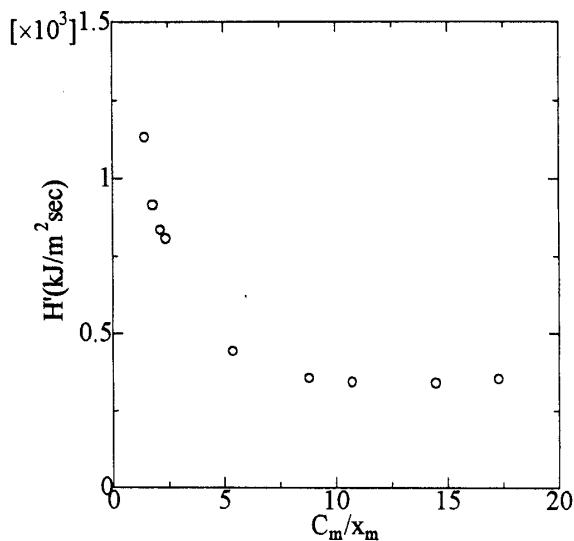


Fig. 9 Relation between non-dimensional concentration gradient and flame heat value

図2の測定される未燃時の濃度分布から可燃範囲内のメタンの流量を計算、モル数に換算して、単位時間あたりの推定最大熱量  $H$  [kJ/s] を見積もった。この値を用いて直接写真から測定される最大火炎幅までの予混合火炎全面を発熱した面として、局所の発熱量  $H'$  [kJ/m<sup>2</sup>s] を求めた。図9は濃度こう配の大きさが推定最大発熱量に及ぼす影響について示したものである。縦軸は見積もられる単位時間単位面積あたりの局所推定最大発熱量  $H'$  である。横軸は無次元濃度こう配を示している。図9より濃度こう配が急になるにつれて発熱量  $H'$  は徐々に減少して  $H'=300 \text{ kJ/m}^2\text{s}$  程度であるが、反対に濃度こう配が緩やかになるとつれて発熱量  $H'$  が急激に増大して、 $H'=1000 \text{ kJ/m}^2\text{s}$  程度と約3倍大きくなる。この傾向は、図8で示された火炎先端のOHラジカル発光強度の傾向と同様である。

この図9より濃度こう配が緩やかになると火炎先端部で反応が急激に促進されていると考えられ、図9の測定されるOHラジカル発光強度の結果がこれを裏付けている。このとき推定最大発熱量を考慮すると、濃度こう配が緩やかな場合局所の発熱量が急激に大きくなることから、火炎先端部の反応が促進されていることを説明できる。したがって今回設定した濃度こう配の変化を発熱量の変化としてみると、トリプルフレームは発熱量の違いによってその先端の特性が支配されると考えられる。

次に図8の△プロットから、濃度こう配が緩やかになるにつれてOHラジカル発光強度の最大値は大きくなることが読み取れる。しかしさらに緩やかな状態の  $C_m/x_m < 2.5$  になると明らかに  $I'_{\max}/I_{\max}$  の値が下がる傾向を示す。また図8の□プロットから、濃度こう配の大きさにかかわらず火炎先端位置からOHラジカル発光強度最大値の位置までの幅が5mm程度で変化しないことがわかる。従来の研究においてSohrabら<sup>(11)</sup>は対向流場で形成されるトリプルフレームでは、火炎が相互に干渉することで燃焼強度が強まり、消炎しにくくなると記している。これより火炎間に相互干渉がある場合、燃焼が活発になりOHラジカル発光強度の値が高くなると考えられる。したがって、この最大値の違いを純粹に燃焼反応の変化としてとらえ、濃度こう配の違いによる火炎先端領域の現象の変化を次のように検討した。

まず濃度こう配が急なときは予混合火炎面が拡散火炎を挟むように非常に近い位置で形成されているが、測定されるOHラジカル発光強度の最大値はそれほど高い値ではない。つまり予混合火炎後流の3種類の

火炎が枝分かれしている領域で燃焼反応が活発でなく、予混合火炎面と拡散火炎間の相互干渉が弱いことを示している。次にこの状態から徐々に濃度こう配が緩やかになるとOHラジカル発光強度の最大値が大きくなり、この領域で燃焼反応が強いことを示唆している。つまり予混合火炎面と拡散火炎間の相互干渉が強くなっていると考えられる。ここからさらに濃度こう配が緩やかになると、図9で示したように局所の発熱量はさらに大きくなるはずであるが、図8のようにOHラジカル発光強度の最大値は下がってくる傾向を示し、燃焼反応が弱くなっていると考えられる。このことは予混合火炎面と拡散火炎間の相互干渉が弱くなっていることを示している。相互干渉の度合いが弱くなる理由についてはこれらのデータからは説明できない。ここで前述した拡散火炎端にあたる部分予混合火炎に相互干渉による影響が現れるとすると、次のようにとらえることができる。濃度こう配が急なときは局所の発熱量も小さく部分予混合火炎の領域も小さいが、濃度こう配が緩やかになると局所の発熱量が大きくなり部分予混合火炎の領域も大きくなる。このことから、予混合火炎と拡散火炎が相互に干渉して部分予混合火炎領域のOHラジカル発光強度が大きくなる。しかしさらに濃度こう配が緩やかになると、火炎が不安定になる。この不安定現象の要因としては流体力学的不安定性や拡散熱的不安定性などが考えられる。この不安定性により相互に干渉してもその効果が薄れると考えられる。ただし、これについては詳細に検討が必要であり、今後の課題の一つである。

従来の研究ではBrayら<sup>(15)</sup>がトリプルフレームの予混合火炎面と拡散火炎との間に有限の距離があることを予測している。彼らは濃度こう配が増加すると火炎同士が近づいていわゆるトリプルポイントとなると検討しているが、裏付けはない。またPetersら<sup>(17)</sup>の熱発生率の結果では、熱発生率のピーク値は火炎先端で一つ、0.4mm後流で各予混合火炎面の二つ、3.4mm後流側で二つの間に三つめの拡散火炎のピークが現れ、7.4mm後流側で拡散火炎のピーク値が大きくなると確認できる。これは予混合火炎面と拡散火炎が離れて形成されていることを示唆しているが、彼らはこの領域を火炎先端としてまとめ、相互干渉を示唆する結果は示されていない。図8の□プロットのように本研究で計測された火炎先端位置とOHラジカル発光強度最大位置との幅が4~5mm程度であるが、Petersらの示した熱発生率の三つのピーク値が現れる3.4~7.4mmと近い値をとっている。したがって

$y_t$  と  $y_{\max}$  位置が予混合火炎面位置と拡散火炎先端位置にあたり、これらの火炎面が火炎先端領域において離れて形成されているものであると判断できる。また OH ラジカル発光強度の最大値の変化が、予混合火炎面と拡散火炎との相互干渉を示すものであると考えられる。

#### 4. 結 言

メタン・空気を用いた濃度こう配を有する混合気中にトリプルフレームを形成させ、設定する濃度こう配の大きさをパラメータとして実験を行った。得られた火炎形状、OH ラジカル発光強度などから火炎先端領域の特性を検討し、次のような結論を得た。

(1) トリプルフレームで形成される U 字形の予混合火炎面幅は、未燃時の可燃範囲幅よりも広い。この可燃範囲幅を基準に考えると、予混合火炎面幅は濃度こう配が急な場合ほど広がる。

(2) トリプルフレームは、濃度こう配を変化させることでその特性の変化が火炎先端領域に現れる。OH ラジカル発光強度の変化を燃焼反応の活性度の変化としてとらえると、濃度こう配が緩やかなほど燃焼反応が活発であると判断できる。設定する濃度こう配の大きさから見積もる局所の推定最大発熱量を考慮すると、この振る舞いは発熱量の変化により現れる現象として説明できる。

(3) トリプルフレームの火炎先端領域では、予混合火炎面と拡散火炎先端が離れて形成されている。この二つの火炎の間には相互干渉がみられる。OH ラジカル発光強度から判断すると濃度こう配が緩やかな設定では、火炎間で干渉してその影響が拡散火炎端に現れる。観測される OH ラジカル発光強度の最大値は、この火炎相互の干渉の度合いを表すものである。

本研究の一部は財団法人マツダ財団助成金によって行われたものである。ここに記して感謝の意を表す。

#### 文 献

- (1) Peters, N., *Combust.Sci. Technol.*, **30**(1983), 1-17.
- (2) Müller, C. M., Breitbach, H. and Peters, N., *Proc. 25th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1994), 1099-1106.
- (3) Domingo, P. and Vervisch, L., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1996), 233-240.
- (4) Phillips, H., *Proc. 10th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1965), 1277-1283.
- (5) Chung, S. H. and Lee, B. J., *Combust. Flame*, **86**(1991), 62-72.
- (6) Lee, B. J., Kim, J. S. and Chung, S. H., *Proc. 25th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1994), 1175-1181.
- (7) Lee, B. J. and Chung, S. H., *Combust. Flame*, **109**(1997), 163-172.
- (8) Chung, S. H., *Proc. 2nd Asia-Pacific Conf. Combust.*, (1999), 39-46.
- (9) Ko, Y. S. and Chung, S. H., *Combust. Flame*, **118**(1999), 151-163.
- (10) Takahashi, F., Schmoll, W. J. and Katta, V. R., *Proc. 27th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1998), 675-684.
- (11) Sohrab, S. H., Ye, Z. Y. and Law, C. K., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, The Combustion Institute, (1984), 1957-1965.
- (12) Lin, T. H. and Sohrab, S. H., *Combust. Flame*, **68**(1987), 73-79.
- (13) Najm, H. N., Knio, O. M., Paul, P. H. and Wyckoff, P. S., *Combust. Sci. Technol.*, **140**(1998), 369-403.
- (14) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Liñán, A., *Combust. Flame*, **95**(1993), 276-290.
- (15) Kioni, P. N., Bray, K. N. C., Greenhalgh, D. A. and Rogg, B., *Combust. Flame*, **116**(1999), 192-206.
- (16) 野田進・山本修平・小沼義昭, 機論, **65**-635, B(1999), 2519-2525.
- (17) Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N. and Mansour, M. S., *Combust. Flame*, **115**(1998), 335-353.
- (18) 山下博史・堤谷進也・崔洛挺, 機論, **65**-630, B(1999), 775-782.
- (19) 和久智裕・山下博史・竹野忠夫, 機論, **62**-601, B(1996), 3502-3509.
- (20) Ruetsch, G. R., Vervisch, L. and Liñán, A., *Phys. Fluids*, **7-6** (1995), 1447-1454.