火炎色による層流予混合火炎の当量比計測*

立田 節雄^{*1}, 藤田 修^{*2}, 伊藤 献一^{*2}Applying Flame Colors to Mixture Strength Measurement
in Laminar Premixed Flames

Setsuo TATSUTA, Osamu FUJITA and Kenichi ITO

A mixture strength measurement in laminar premixed flames is based on changes in flame colors caused by the variation of mixture strength. Flame colors were quantitatively determined by chromaticity coordinates (x, y) defined by the CIE 1931 standard colorimetric system. The (x, y) of an inner cone in fuel/air premixed laminar flames held on a circular tube burner were measured with a colorimeter, and the relationship between the (x, y) and the equivalence ratio of the mixture was examined in a range where the equivalence ratio varied from about 0.9 to 1.4. The results of the experiments indicate that the equivalence ratio can be measured with an accuracy of more than 0.04 in LPG, gasoline, kerosene and city gas 6 C flames. The results also indicate that in the LPG flames burning conditions such as burner diameter, mixture velocity and mixture temperature have almost negligible effects on the accuracy of the measurement.

Key Words: Premixed Combustion, Laminar Flame, Measurement and Control, Flame Color, Equivalence Ratio, Chromaticity Coordinates, Colorimeter

1. ま え が き

炭化水素を燃料とする予混合火炎の内炎の色は、混合気の当量比によって変化し、一般に、燃料が過濃な状態では青緑に、そして希薄な状態では青紫になることが知られている。家庭用ガス器具など予混合火炎を形成する小形燃焼機器では、このような火炎色の変化から、燃焼状態が最適になるよう空気量の調節が行われている。しかし、目視観察による火炎色の認識には個人差があり、しかも生理的要因や心理的要因などの影響を受けるため、火炎色から当量比を推定するには熟練を必要とし、その推定精度には限界があった。

著者らは以前の研究⁽¹⁾において、プロパン層流予混合火炎の内炎の色をXYZ表色系色度座標で数値化するとともに、可視域における発光をCHラジカル、C₂ラジカルのバンドスペクトルおよびそれら以外の連続スペクトルに分け、それぞれの発光成分について色度座標と刺激和を調べることで、火炎色の決定要因を考察した。さらに、当量比による火炎色の変化を色度座標で精度よく表現できることから、火炎色に

よって当量比を測定できる可能性があることを示した。

しかし、実際の燃焼装置において火炎色により当量比を測定しようとする場合、バーナ寸法、混合気流速および混合気温度などの燃焼条件や燃料の種類が、色度座標と当量比の関係に及ぼす影響をあらかじめ把握しておく必要がある。また、予混合バーナ火炎は三次元的な色の分布をもっていると予想されることから、色度座標の測定位置などについても十分な検討が必要となる。

本研究の目的は、色度座標で数値化された火炎色と当量比の関係を用いて、当量比を非接触計測するさいの測定精度と測定上の問題点を明らかにすることにある。そこで、LPGを燃料とする層流予混合バーナ火炎について、色度座標と当量比の関係を詳細に測定し、色度座標の測定条件や燃焼条件が測定精度に及ぼす影響を明らかにした。また、ガソリン、灯油、都市ガス、およびメタノール火炎についても測定を行い、燃料の種類による測定精度の違いを明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

2・1 バーナ火炎 実験装置の概略を図1に示す。本研究で対象とした火炎は静止大気中に形成される層

* 原稿受付 1995年5月26日。

^{*1} 正員、旭川工業高等専門学校 (〒071 旭川市春光台2-2)。^{*2} 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13西8)。

流予混合バーナ火炎である。バーナは内径 d が 6 mm から 12 mm の銅製円管バーナであり、二次元トラバース装置に固定されている。バーナ管の長さは出口において十分に発達した層流が得られるようにした。燃料には、LPG (JIS 1 種 1 号, C_3H_8 : 96.0, C_2H_6 : 3.3, n - C_4H_{10} : 0.6, iso- C_4H_{10} : 0.1 vol%), 自動車ガソリン (JIS 2 号), 灯油 (JIS 1 号), メタノール (試薬特級) および都市ガス 6C (H_2 : 49.3, CO : 5.8, CH_4 : 1.2, C_3H_8 : 0.3, C_4H_{10} : 9.8, O_2 : 4.4, CO_2 : 11.7, N_2 : 17.5 vol%) を使用した。液体燃料はビューレットで計量されたのち微量ポンプで気化室に送られる。気体燃料はボンベから減圧弁, ニードルバルブおよびオリフィスをへて, 空気はプロアから除じん用フィルタおよびオリフィスをへて混合室に供給される。混合気温度 t は混合室の出口に設けた K 熱電対で測定されており, 燃料および空気の流路に巻かれた電気ヒータで調節される。

なお, 本研究の燃焼条件において, バーナを流れる混合気のレイノルズ数はおおよそ 300 から 1200 の範囲にあり, 形成される層流予混合バーナ火炎の内炎の高さ L は約 7 mm から 45 mm 程度であった。

2.2 火炎色の数値化 火炎色は, 光源色を測定できる色彩計 (ミノルタ CS 100⁽²⁾) を用い, 既報⁽¹⁾と同様に XYZ 表色系色度座標 (x, y) で数値化した。この色彩計は, 等色関数と同じ波長特性をもつ光学フィルタと光電素子の組合せで三刺激値を求める刺激値直読方式のもので, 測定に要する時間は約 1.4 s である。色彩計の受光部にはクロズアップレンズを取付けており, 色度座標は直径 1.5 mm の測定円内の平均値として得られる。輝度が 12 cd/m² 以上の A 光源で測定した場合, 色度座標の測定確度および繰返し性は, それぞれ ± 0.004 以内および ± 0.002 以内である。色彩計の精度の検定は, 色度座標が当量比および測定位置によらずつねに一定値 (0.220, 0.215) となる CO 予混合火炎⁽³⁾ を標準光源に用いて定期的に行った。通常の測

定では, 色彩計の光軸が火炎の中心軸に対して垂直になるように設置し, 色彩計の焦点位置を火炎の中心軸上に合せた。

3. 測定原理

火炎色による当量比計測では, (1) 燃料の種類ごとに, 色度座標 (x, y) で数値化した火炎色と当量比 ϕ の関係をあらかじめ調べておき, (2) 次に, ϕ を測定しようとする火炎で (x, y) を測定し, すでに得られている (x, y) と ϕ の関係を用いて ϕ を決定する。

LPG 火炎において, 火炎の中心軸上で, バーナ先端からの軸方向距離 H が内炎の高さ L の 1/2 となる位置で測定した (x, y) と ϕ の関係の一例を図 2 に示す。燃焼条件は, バーナ直径 d が 8.0 mm, 混合気流速 u が 1.2 m/s, 混合気温度 t は 25°C である。

当量比 ϕ による (x, y) の変化を見ると, y 座標は $\phi < 1.0$ の範囲で ϕ とともにゆるやかに増加し, $1.0 < \phi < 1.4$ ではほぼ直線的に大きな増加を示している。また, y は ϕ が約 1.4 で最大となり, それ以上の ϕ では減少する。一方, x 座標は ϕ とともに単調に増加しているものの, ϕ に対する x の変化は全体的に小さく, $1.0 < \phi < 1.4$ の範囲では, y の変化の 1/6 程度である。したがって LPG 火炎では, 測定した (x, y) から ϕ を決定するさい, y と ϕ の関係を用いるほうが, x と ϕ の関係を用いるよりも高い精度が得られることになる。ただし, ϕ が 1.4 以上の火炎をも測定対象にする場合には, y と ϕ の関係のみでは, 過濃側において二つの ϕ が得られることになるので, x と ϕ の関係も同時に用いて ϕ を決定する必要がある。

色度座標 (x, y) と ϕ の関係をあらかじめ調べた火炎と, 実際に ϕ を測定しようとする火炎で, (x, y) の測定方法および燃焼条件が同じ場合, ϕ の測定精度は ϕ に対する (x, y) の変化率と (x, y) の測定精度によって決まる。図 2 に示されている y と ϕ の関係を見ると, ϕ に対する y の変化率 $\Delta y / \Delta \phi$ は, $0.9 < \phi < 1.0$ で

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Relation between (x, y) and ϕ

は約0.10であり、 $1.0 < \phi < 1.4$ では約0.33である。また、色彩計の (x, y) の測定精度は ± 0.002 以内であることから、LPG火炎における ϕ の測定精度は、 $0.9 < \phi < 1.0$ では ± 0.02 程度、 $1.0 < \phi < 1.4$ では ± 0.01 以上と推定され、この場合には、色彩計を用いて簡単に、しかも極めて高精度で当量比を測定できることがわかる。

4. 測定上の問題点

予混合バーナ火炎では、円すい状の形をした内炎の周囲に内炎と異なる色をもった外炎が軸対称に形成されており、測定される内炎の色度座標 (x, y) には外炎からの発光の影響が含まれている。色彩計に入射する内炎からの発光と外炎からの発光の強度比は、場所によって異なると予想され、内炎自体の色も場所によって異なる可能性がある。したがって、 (x, y) の値は、測定する位置や色彩計の火炎に対する方向に依存すると考えられる。さらに、 (x, y) と ϕ の関係が、バーナ寸法、混合気流速および混合気温度などの燃烧条件の影響を受けることも考えられる。

それゆえ、 (x, y) と ϕ の関係をあらかじめ調べた火炎と、実際に ϕ を測定しようとする火炎で、 (x, y) の測定条件および燃烧条件が異なる場合には、 ϕ の測定精度に影響が出てくることが予想される。

5. 実験結果および考察

5.1 色度座標測定条件の影響 半径方向の測定位置の影響を明らかにするため、 ϕ が0.96および1.36のLPG火炎において、色度座標 (x, y) の半径方向分布を測定した。 $H/L=0.25, 0.5$ および0.75における測定結果を図3に示す。図3の横軸 R は火炎の中心軸からの半径方向距離であり、図3中の斜線は内炎の最も外側の位置を示す。また、黒、白黒および白の記号は、それぞれ、直径1.5 mmの測定視野に内炎のみ、内炎と外炎の両方、そして外炎のみが入っている場合のデータである。

図3より、内炎の (x, y) は、 ϕ および H によらず半径方向にほぼ一定であるが、内炎と外炎の境界付近では、 (x, y) の値が半径方向の測定位置に依存していることがわかる。また、外炎の (x, y) は、 ϕ, H および R によらずほぼ一定値(0.224, 0.228, 0.217-0.220)となっている。したがって、内炎のみを視野に入れて (x, y) を測定する限り、半径方向の位置は ϕ の測定精度に対して影響を及ぼさないことは明らかである。

次に、軸方向の測定位置の影響を調べるため、LPG火炎の中心軸上において、 $H/L=0.25, 0.50$ および0.75

Fig. 3 Effect of radial position
($u=1.2$ m/s, $d=8$ mm, $t=25^\circ\text{C}$)

Fig. 4 Effect of axial position
($u=1.2$ m/s, $d=8$ mm, $t=25^\circ\text{C}$)

で測定した (x, y) と ϕ の関係を図4に示す。

y は $0.9 < \phi < 1.4$ の範囲で内炎の先端側ほど大きくなっている。 H による y の違いは ϕ とともに大きくなり、 $H/L=0.25$ と0.75で値を比較すると、 $\phi=1.0$ では0.006、 $\phi=1.4$ では0.020の違いが見られる。一方、内炎の先端が不明りようとなる $\phi > 1.5$ では、 y は逆

に基部側ほど大きくなっている。 x は ϕ にらず先端側ほど大きく、 $H/L=0.25$ と 0.75 では 0.002 から 0.008 の違いがある。このように (x, y) が軸方向の位置で異なるおもな原因として、選択拡散⁽⁴⁾⁽⁵⁾ により、内炎の火炎帯における局所的な ϕ が軸方向に分布をもっていることが考えられる。すなわち、LPG 火炎では混合気中の酸素よりも燃料成分の拡散速度が小さいために、内炎の基部側ではバーナ出口における混合気よりも燃料成分がわずかに希薄な状態で燃烧しており、先端側では過濃な状態で燃烧しているためと推察される。

以上の結果より、 (x, y) を測定する軸方向の位置は、 (x, y) から混合気の ϕ を求めるさいの誤差の要因になることが明らかになった。しかし、軸方向の測定位置が $0.25L < H < 0.75L$ の範囲であれば、 $H=0.5L$ で測定された y と ϕ の関係を用いて ϕ を求めることにより、軸方向の測定位置によって生ずる ϕ の測定誤差は、 $\phi=1.0$ では ± 0.02 、 $\phi=1.4$ では ± 0.04 程度に抑えることができる。

図5は、 $\phi=1.03, 1.26$ および 1.45 の LPG 火炎において、色彩計の焦点位置を火炎中心軸上の $H/L=0.5$ に合せ、色彩計の光軸と火炎の中心軸との成す角度 θ を 90° から 45° まで変化させて (x, y) を測定した結果である。図5より、 θ による (x, y) の違いはおおよそ ± 0.003 であり、色彩計の焦点を内炎の中央部、すなわち $H/L=0.5$ 付近に合せている限り、 θ による ϕ の測定誤差は無視できる程度であることがわかる。

5.2 燃烧条件の影響 図6から図8は、 (x, y) と ϕ の関係に及ぼすバーナ径 d 、混合気流速 u および混合気温度 t の影響を LPG 火炎の中心軸上で調べた結果である。図6～8の白、白黒、黒の記号は、それぞれ、 $H/L=0.25, 0.50$ および 0.75 におけるデータで

ある。

図6～8より、 H/L が同じ位置で (x, y) を測定する場合には、本実験の範囲で燃烧条件を変化させても、

Fig. 6 Effect of burner diameter ($u=1.2$ m/s, $t=25^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Effect of mixture velocity ($d=8$ mm, $t=25^\circ\text{C}$)

Fig. 8 Effect of mixture temperature ($u=1.8$ m/s, $d=8$ mm)

Fig. 5 Effect of θ ($u=1.8$ m/s, $d=8$ mm, $t=25^\circ\text{C}$)

(x, y) と ϕ の関係は 1 本の曲線で表せることがわかる。このことは燃焼条件によって内炎の寸法が変化しても、 H/L が同じ位置での色は、 ϕ のみによって一義的に決まることを意味している。以上のように、 H/L が同じ位置で (x, y) を測定する場合には、燃焼条件が (x, y) と ϕ の関係に及ぼす影響は極めて少なく、燃焼条件の違いによって生ずる ϕ の測定誤差はおおよそ ± 0.03 以下である。それゆえ、本計測方法は比較的広い範囲の燃焼条件に適用できること、さらに (x, y) と ϕ の関係をあらかじめ調べた火炎と ϕ を実際に測定しようとする火炎で、燃焼条件が同一である必要がないことがわかる。

5.3 燃料の種類による違い 燃料の種類による ϕ の測定精度の違いを明らかにするため、ガソリン、灯油、都市ガス 6C およびメタノールについても (x, y) と ϕ の関係を調べた。その結果を図 9 に示す。

ガソリンおよび灯油では、LPG に比べて (x, y) と ϕ の関係が全体的に希薄側に移動しており、 H による

(x, y) の違いがわずかに大きくなる傾向が見られる。しかし、 ϕ に対する y の変化率が LPG とほぼ等しいことから、ガソリンおよび灯油でも、LPG と同等の精度で ϕ を測定できることがわかる。都市ガス 6C の (x, y) は、 $\phi < 1.1$ ではほとんど変化しないが、 $\phi > 1.1$ では y が急激に増加しており、この範囲では LPG とほぼ等しい測定精度が得られる。また、都市ガス 6C では y と ϕ の関係が H に依存していないことから、 H は ϕ を測定するさいの誤差要因にならないことがわかる。一方、メタノールの (x, y) は ϕ および H にほとんど依存しておらず、 $1.0 < \phi < 1.4$ の範囲において、 x は 0.218 から 0.220、 y は 0.204 から 0.211 となっている。このように、 ϕ に対する (x, y) の変化率が極めて小さいメタノールでは測定精度が低くなり、本計測方法を適用することは困難である。

測定した (x, y) から ϕ を決定するさい、燃料の種類ごとに ϕ と (x, y) の関係が数式化されていると便利である。表 1 は、 ϕ と y の関係を式 (1) のような三次式で表し、図 4 および図 9 に示されている $\phi < 1.4$ のデータを用いて、最小二乗法で計算した係数 a, b, c, d および偏差をまとめたものである。

Fig. 9 Effect of fuel

Table 1 Coefficients and deviation of eq. (1)

Fuel	Applicable Range of ϕ	a	b	c	d	Deviation
LPG	0.90-1.40	96.336	-82.822	26.165	-1.6089	0.026
Gasoline	0.85-1.25	78.856	-79.766	28.933	-2.3711	0.027
Kerosene	0.90-1.25	-156.32	104.96	-18.631	1.6328	0.029
City Gas 6C	0.80-1.40	963.24	-742.55	192.28	-15.426	0.030

$$\phi = ay^3 + by^2 + cy + d \dots\dots\dots (1)$$

式(1)を用いて、 $0.25 < H/L < 0.75$ の範囲で測定した y から ϕ を求めるさいの偏差は、表1に示した適用範囲内では、いずれの燃料においても ± 0.03 以内であり、 y と ϕ の関係は簡単な実験式で整理できる。

6. 本計測方法の応用と課題

層流予混合バーナ火炎では、火炎色を色度座標で数値化することにより、極めて高い精度で当量比を測定できることが明らかとなった。このことは、層流予混合バーナ火炎が形成される小形燃焼機器では、色彩計などの色計測装置を用いて燃焼時の当量比を容易に測定できること、さらに燃焼機器に色センサとマイクロコンピュータを組み込んでおくと、当量比をフィードバック制御できる可能性があることを示唆している。

なお、本計測方法を燃焼機器に応用する場合には、色度座標の測定条件によって生じる誤差が比較的小さいことから、内炎全体の発光を受光するような光学系と色センサの組合せで色度座標を測定しても問題はなく、それらを取付ける位置や方向も厳密さを必要としないと思われる。また、色度座標と当量比の関係が燃焼条件の影響を受けづらいことから、本計測方法は燃焼機器のバーナ形状や燃焼負荷に依存することなく、液体燃料を用いる予気化予混合形の燃焼機器のように混合気が予熱されるものにも適用できると考えられる。さらに、炭素数および分子構造の異なる15種類の単一燃料について色度座標と当量比の関係を調べた結果⁽³⁾によると、メタン以外の炭化水素では、当量比に対する色度座標の変化率に大きな差のないことが示された。したがって、燃料の種類によって測定精度はいくぶん異なるが、大部分の炭化水素に本計測方法を適用できる可能性があると考えられる。

測定上の留意点としては、火炎発光以外の可視光を完全に遮断すること、バーナ孔に汚れが付着していたり、空気中に浮遊粒子が大量に含まれているような環境では、炭素分の燃焼による輝炎の発生や、Naの熱発光の影響を受ける場合があることなどがあげられる。また、実用上の観点からは、応答性および耐久性に優れた安価な色計測装置の開発、受光面の汚れなどの対策が今後の課題である。

7. 結 論

層流予混合バーナ火炎において、色度座標で数値化した火炎色により当量比を測定するさいの精度および測定上の問題点について検討した。その結果、以下の事柄が明らかとなった。

(1) 市販の色彩計を用いて、当量比を簡単に、しかも極めて高い精度で測定できることを示した。

(2) 当量比の測定精度は、内炎のみを視野に入れて色度座標を測定する限り、半径方向の位置および色彩計の光軸と火炎中心軸との成す角度に依存しない。

(3) 色度座標を測定する軸方向の位置は、当量比を測定するさいの誤差要因となる。しかし、軸方向の測定位置が $0.25 < H/L < 0.75$ の範囲であれば、測定誤差を ± 0.04 以下に抑えることができる。

(4) H/L が同じ位置で色度座標を測定する場合には、当量比の測定精度はバーナ直径、混合気流速および混合気温度の影響をほとんど受けない。

(5) ガソリン、灯油および都市ガス6C火炎についても、LPG火炎と同等の精度で当量比を測定できる。しかし、当量比に対する色度座標の変化が小さいメタノール火炎には、本計測方法を適用することはできない。

文 献

- (1) 伊藤献一・ほか3名, 機論, 56-531, B(1990), 3508-3513.
- (2) 山崎康雄, 計測技術, 増刊号, (1987), 158-161.
- (3) 立田節雄・ほか3名, 第29回燃焼シンポジウム前刷集, (1991), 457-459.
- (4) Mizomoto, M., ほか3名, Proc. 20th Int. Symp. Combust., (1984), 1933-1939.
- (5) Mizomoto, M. and Yosida, H., Combust. Flame, 70 (1987), 47-60.