# ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

# 対向流予混合火炎中の OH 濃度と燃焼速度

OH Concentration and Burning Velocity in Counterflow Premixed Flames

山本 和弘\*・伊佐山 勉・林 直樹・山下 博史

YAMAMOTO, Kazuhiro\*, ISAYAMA, Tsutomu, HAYASHI, Naoki, and YAMASHITA, Hiroshi

名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

2007年3月23日受付; 2007年6月30日受理/Received 23 March, 2007; Accepted 30 June, 2007

Abstract : In this study, we have simulated counterflow premixed flames to discuss burning velocity and OH concentration. Two-types of flow configuration are considered. One is twin premixed flames in symmetric counterflow premixed mixtures. The other is a single-flame in counterflows consisted of premixed mixture and air. The fuel is propane, and the equivalence ratio is 0.7 to 1.0. The detailed chemical kinetics model of GRI-Mech 3.0 using 53 species and 325 reactions is adopted. To change the stretch rate, the inflow velocity is varied from 0.5 to 3.5 m/s. The distance between two inflow boundaries is 15 mm. Based on the reaction rate, we have estimated the burning velocity at different stretch rates. Results show that the burning velocity is decreased with an increase of stretch rate. The burning velocity of the single-flame is smaller than that of twin flames at the same equivalence ratio and stretch rate. The clear relationship between maximum OH concentration in the flame zone and burning velocity is observed especially in the case of single-flame.

Key Words : Premixed flame, Burning velocity, OH, Counterflow flame, Stretch

# 1. 緒言

近年,高い時間・空間分解能を持つレーザ計測法が開 発されており,例えばレーザ誘起蛍光法 (LIF 法) などによ り瞬時の火炎構造についての詳細な測定が行われている [1-7]. これにより,乱流燃焼場をモデル化する試みが検討 されてきた[8-11]. 乱流燃焼は非定常かつ 3 次元の現象で あり,火炎と流れが相互作用する複雑な場となっている. 例えば,火炎伸長,火炎曲率,非定常性等が火炎構造に影 響を与えるが,これらを個別に検討することはできない. そこで,より基本的な流れ場である定常もしくは非定常の 対向流火炎を用いた実験や数値解析による研究が行われて きた[12-19]. 対向流火炎は,伸長流れに形成される定在火 炎であるため,計測がしやすいことや相似解による 1 次元 の解析が可能なため,乱流火炎のモデリングに役立つ多く の知見が得られている.

Becker らは、乱流火炎において、火炎帯付近で観測され る OH 濃度の最大値により局所の燃焼速度を見積ることが 可能であることを報告している[20]. このような関係が確 認できれば、燃焼場の OH 濃度を LIF 法などにより測定す ることで,乱流場での局所の燃焼速度を定量的に評価する ことができる.

そこで本研究では、対向流予混合火炎を対象に、伸長率 や当量比を変化させて、OH 濃度の最大値と燃焼速度の関 係について検討を行った。燃料にはプロパンを用い、同じ 予混合気を対向させる双子火炎と、一方を空気とした対向 流火炎の2つ[19]について検討した。

### 2. 解析モデルおよび計算方法

図 1(a),(b) に解析モデルを示す.本研究では予混合気 に対向する側の流体として,常温の空気を用いる Singleflame, および同じ予混合気を用いる Twin-flame の2種類に ついて検討する. Twin-flame はいわゆる双子火炎であり, これまでの対向流火炎の実験や数値解析で一般によく用い られるモデルである.一方, Single-flame は空気雰囲気中 に予混合気を噴出させる場合に相当し,実際のバーナ火炎 に近い条件であると思われる.これらの燃焼場は,火炎背 後の熱損失の有無という点で異なり,これまでの解析にお いて火炎温度などに差が出ることを確認している.今回は これら2つの火炎に対し,当量比や流速(伸長率)を変化さ せて解析を行った.

<sup>\*</sup> Corresponding author. E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp



Fig.1 Schematics of the counterflow flames

流れ場は二次元のポテンシャル流とし、温度場および濃 度場においては相似解が適用できるものとする[19,21,22]. 座標系は、図1に示すように15mm離れた2つのノズルが 対向しているものとし、一方のノズルの中心を原点として、 ノズル軸方向および軸に垂直方向の座標を(*x*,*y*)、それぞれ の速度成分を(*u*,*v*)とする. Single-flame については、それ ぞれのノズルから予混合気と空気を対向させるため全領域 を計算するが、Twin-flame についてはそれぞれのノズルか ら同じ混合気を噴き出すため対称条件を用いて片側だけを 解いた. 圧力は大気圧とし、2つのノズル位置での温度は 300 K である.

基礎方程式は連続の式,運動量保存の式,エネルギーの 保存式および各化学種の連続方程式と状態方程式である. また,①混合気は理想気体とする,②Soret 効果,Dufour 効果,圧力拡散の効果は無視する,③粘性散逸項および圧 力仕事項は無視する,の3つの仮定を用いることにする. 速度場については,二次元のポテンシャル流を仮定してい るため,ノズル軸方向の運動量の勾配が一定となる解析解 を与えた.各化学種の連続方程式およびエネルギーの保存 式は以下のように表される.

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_i)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x}) = w_i \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) = -\frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i$$
(2)

ここで、 $\rho$  は混合気体の密度、T は温度、 $c_p$  は定圧比熱、  $\lambda$  は熱伝導率、 $Y_i$  は化学種 i の質量分率、 $D_i$  は有効拡散係 数、 $w_i$  は質量生成速度、 $h_i$  はエンタルピーである. これら の式の離散化には有限体積法を用いた. 対流項の差分化に は一次風上差分、時間方向については Euler の完全陰解法 を適用し、時間刻みは  $5 \mu s$  とした. 各時間ステップにおい て、SOR 法による繰り返し計算を行った. Single-flame に おいては予混合気と空気のノズル間距離 15 mm に対して 200 点の格子を配置するため、格子間隔は 0.075 mm とな る. 一方、Twin-flame では対称を仮定したため、 $x=0 \sim 7.5$ mm について計算を行った. 格子は 100 点の等間隔格子と し、Single-flame の計算と同じ 0.075 mm の格子間隔を用いた.



Fig.2 Profiles of velocity in x-direction, temperature, heat release rate and OH concentration for twin-flames;  $\phi = 0.9$ ,  $U_{in} = 1.0$ , 1.5, 2.5, and 3.5 m/s

反応機構には GRI-Mech 3.0 を用いた[23]. 計算に用いた 化学種は 53 個,反応は 325 の素反応を考慮した. 熱力学 定数については CHEMKIN データベース[24]から求めた. 燃料にはプロパンを用い,当量比は 0.7 から 1.0 とした. また,輸送係数については, Smooke の Simplified Transport Model[25]を用いた.

# 3. 解析結果および考察

### 3.1. Twin-flame の火炎構造と燃焼速度

まず、本計算により得られた Twin-flame の火炎構造について説明する.当量比を 0.9 で一定にし、流入速度 (U<sub>in</sub>)を 1.0 m/s から 3.5 m/s まで変化させた場合に得られた流速 u, 温度 T,熱発生速度 q,および OH 濃度 C<sub>OH</sub> の分布をそれ ぞれ図 2 に示す.これによると、流速を増加させることに より火炎がよどみ面方向に移動し、これら 4 つの分布も移 動していることがわかる.また、最高温度は減少した.図 2 の OH 濃度場においては、流速を増加させるとよどみ面 (x = 7.5 mm)における OH 濃度が上昇し、OH 濃度分布の形 状が変化することがわかった.このような OH 濃度分布の 変化は、OH-LIF 法による燃焼場の計測により Yamamoto ら が既に指摘している[1].すなわち、よどみ面をはさんだ反 対側の OH 濃度分布を考慮すると、流速が低い場合は 2 つ の濃度ピークを持つ M 型の形状となる.さらに流速を 2.5 m/s まで増加させると、ピーク濃度とよどみ面での濃度が



Fig.3 Variations of burning velocity with stretch rate for twin-flames;  $\phi = 0.7, 0.75, 0.8, 0.9$ , and 1.0. The black points are laminar burning velocity obtained in calculation for one-dimensional flame

ほぼ同じになる Π 型に変化した. そして流速が 3.5 m/s で はよどみ面をはさんだ 2 つの火炎が完全に 1 つになる Λ型 になることを本解析でも確認した.

次に燃焼速度について検討した.流入した未燃ガス中の 燃料成分がすべて消費されたと仮定し,以下の式を用いて 燃料の反応速度を積分することにより燃焼速度を算出した [26].反応速度を実行した値以外は反応速度は,火炎面に 対し垂直方向に積分するが,相似解を仮定した対向流火炎 ではx方向の積分になる.

$$\rho_u Y_{fuel} S_L = -\int w_{fuel} dx \tag{3}$$

文献 26 でも指摘されているように,式(3)から求めた燃焼 速度がいわゆる燃焼速度に等しくなるのは1次元火炎だけ であるが,今回は伸長を受けた火炎の燃料消費速度をもと に燃焼速度を求め,局所の燃焼速度について議論した.

当量比  $\phi = 0.7$  から 1.0 の範囲で,流入速度  $U_{in}$  を変化さ せて得られた燃焼速度を図 3 に示す. 横軸は伸長率  $\kappa$  (=  $U_{in}/L$ )とした. ここで L は,ノズル間距離の半分の 7.5 mm である.また比較のため,図中に一様な流れ場に形成され る 1 次元火炎の計算から得られた燃焼速度 (いわゆる層流 燃焼速度  $S_L^0$ )を  $\kappa = 0$ として示した.これによると,いず れの当量比においても,伸長率を増加させると燃焼速度が 低下する結果となった.伸長率を変化させたときのプロパ ン火炎の燃焼速度については、マークシュタイン長さを用 いて検討されており、マークシュタイン数により整理され ている[27-29].これまでの研究において、プロパンの希薄 火炎では、伸長率を増加させた場合は燃焼速度が低下する ことが報告されており、本解析結果と同様であった.また、 伸長率が小さくなると、燃焼速度が層流燃焼速度に近い値 に漸近することがわかった[16].

#### 3.2. Single-flame の火炎構造と燃焼速度

次に, Single-flame と Twin-flame の違いを調べるため,



Fig.4 Profiles of velocity in x-direction, temperature, heat release rate and OH concentration for twin-flame;  $\phi = 0.9$ ,  $U_{in} = 1.0$  m/s

流速 u, 温度 T, 熱発生速度 q, および OH 濃度  $C_{OH}$  の分 布を求めて比較した.  $U_{in} = 1.0 \text{ m/s} \ge 2.5 \text{ m/s}$ において得ら れた結果を図4および図5にそれぞれ示す.

これによると  $U_{in} = 1.0$  m/s では, 2 つの火炎の流れ場, 温度場および濃度場にはほとんど違いが見られず,火炎も ほぼ同じ位置にあることがわかった.ただし温度分布にお いて, Single-flame では x = 6.5 mm 以上で温度が下がって いることがわかった.Twin-flame ではよどみ面で対称境界 となっているため,火炎背後の熱損失がないことからこれ らの違いが説明できる.同様に OH 濃度分布においても, Single-flame ではよどみ面をよぎる拡散があるためよどみ 面付近の OH 濃度が Twin-flame と比較して小さくなってい ることがわかった.

一方,図5の $U_{in}$ =2.5 m/s の場合は,いずれの分布においても両者に大きな違いが見られた.特に,Single-flameはTwin-flameに比べ火炎の位置がよどみ面側にあることがわかる.これは、火炎背後にある常温の空気の影響により温度が下がり、燃焼反応が大きく低下したことによるものと考えられる.以上の結果から、よどみ面から離れた火炎では、Single-flameとTwin-flameの分布にほとんど差がないが、火炎がよどみ面に近づくにつれて温度や熱発生速度などが大きく変化することがわかった.

また、対向する流体の違いによって、燃焼速度がどのように変化するのかを確かめることにした。当量比  $\phi = 0.9$ のときに得られた Single-flame と Twin-flame 結果を比較して図 6 に示す。ただし Single-flame では、流速 3.0 m/s では



Fig.5 Profiles of velocity in x-direction, temperature, heat release rate and OH concentration for twin-flame;  $\phi = 0.9$ ,  $U_{in} = 2.5$  m/s



Fig.6 Variations of burning velocity with stretch rate for twin- and single flames;  $\phi = 0.9$ 

消炎したので,流速 2.5 m/s 以下の結果のみを示した. 図 4 と図 5 で確認したように,流入速度が比較的小さく火炎が よどみ面から十分離れている場合は,両者の燃焼速度はほ とんど同じ値となった.しかし,流入速度がある程度大き くなると,火炎はよどみ面に近づき常温の空気の影響が大 きくなるため, Single-flame の燃焼速度は Twin-flame より も小さくなった.

#### 3.3. OH 濃度と燃焼速度の関係

既に説明したように、Becker らは、火炎帯付近で観測される OH 濃度の最大値が乱流火炎の局所の燃焼速度を予測 するよい指標になることを指摘している[20]. そこで、燃



Fig.7 Variations of maximum OH concentration with stretch rate for twin-flames;  $\phi = 0.7, 0.75, 0.8, 0.9,$  and 1.0



Fig.8 Variations of maximum OH concentration with stretch rate for twin- and single flames;  $\phi = 0.9$ 

焼場の OH 濃度と燃焼速度の関係について調べることにした.まず,図4で示した Twin-flame の燃焼場における最大 OH 濃度を調べた.その結果を図7に示す.これによると,流入速度を増加させて伸長率を大きくすると,はじめ OH 濃度は減少するが,図2で示したように OH 濃度の分布形 状が M 型から  $\Pi$  型,そして A 型に変化すると,OH の最 大濃度は逆に増加することがわかった.

また、伸長率を変えた場合の最大 OH 濃度について、 Twin-flame と Single-flame の結果を比較した. 当量比 0.9 に おいて得られた最大 OH 濃度の結果を図 8 に示す. これに よると、図 7 の Twin-flame とは異なり、Single-flame では 伸長率を増加させると最大 OH 濃度は急激に減少して消炎 した. Single-flame の場合は、火炎背後のよどみ面をよぎ る拡散が常に存在するため、分布形状の変化がなく、OH 濃度は単調に減少することになったものと思われる.

次に両火炎において, 燃焼場の最大 OH 濃度と燃焼速度 の関係について検討することにした.まず, 当量比が 1.0 の場合に得られた最大 OH 濃度と燃焼速度の関係を図 9 に 示す.これは, 流入速度 (伸長率)を変えたときに得られた 結果である.これによると, Single-flame の場合は, 流入 速度を増加させると最大 OH 濃度と燃焼速度がほぼ直線的 に減少していることがわかる.一方 Twin-flame の場合は,



Fig.9 Relationship between maximum OH concentration and burning velocity for twin- and single flames;  $\phi = 1.0$ 



Fig.10 Relationship between maximum OH concentration and burning velocity for twin- and single flames;  $\phi = 0.7$  to 1.0

比較的流入速度が小さい場合において,OH 濃度と燃焼速 度が共に減少し,図に示す Single-flame と同じ直線上にあっ た.しかし図7でも示したように,Twin-flame においては, OH 濃度の分布形状が変化すると最大 OH 濃度は逆に増加 するため,図に示した直線関係からずれてくることがわ かった.

最後に、当量比を変化させて最大 OH 濃度と燃焼速度の 関係を 2 つの火炎について調べた. この結果を図 10 に示 す.比較のため、図 9 で示した直線を図に示した.ただ し、Single-flame では火炎温度や反応速度が Twin-flame に 比べて小さくなるため、定常状態において火炎が形成で きた場合の結果のみを示している.これによると、Singleflame の場合は、当量比を変化させても OH 濃度と燃焼速 度の関係は図 9 で示した直線上にあることがわかった.一 方 Twin-flame の場合は、OH 濃度分布が  $\Pi$  型や  $\Lambda$  型になる 場合を除くと、どの当量比でも最大 OH 濃度と燃焼速度は ほぼ同じ直線上にあることがわかった. いわゆるブンゼンバーナや我々が検討を行っている旋回 噴流燃焼器を用いた乱流燃焼場においては,周囲雰囲気が 空気である場に予混合気を噴出して火炎を形成させる点が Single-flame に近いことから,燃焼場の OH 濃度をレーザ 誘起蛍光法 (LIF 法) などを用いて測定することにより,乱 流燃焼場の局所の燃焼速度を見積ることができることが示 唆された.ただし実際の乱流燃焼場では,今回の解析で検 討した伸長率以外にも,火炎面曲率や非定常性の影響が考 えられるため,今後検討する予定である.

# 4. 結言

本研究では対向流予混合火炎の数値解析を行い,伸長場 における燃焼速度について検討した.同じ予混合気を対向 させる双子火炎 (Twin-flame)と,一方を空気とした対向流 火炎 (Single-flame)の2つについて調べた.その結果,予混 合気を対向させる Twin-flame と比べると,Single-flame で は、よどみ面をよぎる熱・物質移動があるため、火炎温度 や火炎帯での最大 OH 濃度は小さくなった.また反応速度 を積分することにより求めた燃焼速度も小さくなった.伸 長率を変化させたときの OH 濃度と燃焼速度の関係を調べ た結果,Single-flame と OH 濃度分布が M 型になる Twinflame の場合は、当量比によらず最大 OH 濃度と燃焼速度 はほぼ同じ直線関係にあることが確認された.

# 謝辞

本研究をまとめるにあたって,筑波大学の西岡牧人先生 に貴重な御意見を頂きました.ここに記して謝意を表しま す.

# References

- Yamamoto, K., Ishizuka, S., and Hirano, T., Proc. Combust. Inst. 25: 1399-1406(1994).
- Buschmann, A., Dinkelacker, F., Schafer, T., and Wolfrum, J., Proc. Combust. Inst. 26:437 (1996).
- Chen, Y. C., Peters, N., Schneemann, G. A., Wruck, N., Renz, U., and Monsour, M. S., *Combust. Flame* 107: 223-244 (1996).
- Masri, A. R., Kelman, J. B., and Dally, B. B., *Proc. Combust. Inst.* 27:1031-1038 (1998).
- Most, D., Dinkelacker, F., and Leipertz, A., Proc. Combust. Inst. 29:1801-1808 (2002).
- Yamamoto, K., Ishizuka, S., JSME Int. J. Series B, 46-1: 198-205 (2003).
- Yamamoto, K., Inoue, S., Yamashita, H., Shimokuri, D., Ishizuka, S., and Onuma, Y., *Heat Transfer Asian Research*, .35-7: 501-512 (2006).
- 8. Peters, N., Proc. Combust. Inst. 21: 1231-1250 (1986).

- 9. Law, C. K., Proc. Combust. Inst. 22: 1381-1402 (1989).
- 10. Muller, C.J., et al., Combust. Flame 100: 323-331(1995).
- 11. Peter, N., J. Fluid Mech. 384:107-132 (1999).
- Ishizuka, S., and Law, C. K., Proc. Combust. Inst. 19: 327-335 (1982).
- Tsuji, H., and Yamaoka I., Proc. Combust. Inst. 19: 1533-1540 (1982).
- 14. Sato, J. Proc. Combust. Inst. 19: 1541-1548 (1982).
- 15. Matalon, M., Combust. Sci. Tech. 31: 169-181(1983).
- Yu, G., Law, C. K., and Wu, C. K., *Combust. Flame* 63: 339-347 (1986).
- 17. Yahagi, Y., Ueda, T., and Mizomoto, M., *JSME trans. B* (in Japanese) 58-553: 2878-2883(1992).
- 18. Hirasawa, T., et al., Combust. Flame 121: 312-322 (2000).
- Hayashi, N., Yamashita, H., Nakamura, Y., and Yamamoto, K., *JSME trans. B* (in Japanese) 72-713: 208-215 (2006).
- H. Becker, P. B. Monkhouse, J. Wolfrum, R. S. Cant, K. N. C. Bray, R. Maly, W. Pfister, G. Stahl, and J. Warnatz. *Proc. Combust. Inst.* 23: 817-823 (1990).

- 21. Zhao, D., Yamashita, H., Kitagawa, K., Arai, N., and Furuhata, T., *Combust. Flame* 130: 352-360 (2002).
- 22. Shimizu, A., Yamashita, H., Takaishi, Y., and Zhao, D., *JSME trans. B* (in Japanese) 69-678: 453-460(2003).
- 23. GRI-Mech, http://www.me.berkley.edu/gri\_mech.
- 24. Kee, R. J., et al., Sandia Report, SAND 89-8009 (1989).
- Smooke, M. D., Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames, 1-28, Springer-Verlag. (1991).
- Poinsot, T., Veynante, D., and Candel S., J. Fluid Mech. 228:561-606 (1991).
- 27. Davis, S. G., Quinard, J., and Searby, G., *Combust. Flame*, 130 (2002), 123-136.
- 28. Tseng, L. -K., Ismal, M. A., and Faeth, G. M., *Combust. Flame* 95: 410-426 (1993).
- 29. Nakahara, M., Kido, H., and Nahashima, K., *JSME Int. J. Series B* 48-1: 164-171 (2005).