成層混合気中の維持火炎に及ぼす火炎伸長の影響*

北川 敏明^{*1}, 城戸 裕之^{*1}, 金 奎 成^{*2}
中村 望^{*3}, 相嶋 匡也^{*3}

The Effects of Flame Stretch on Supported Flame in Stratified Mixture

Toshiaki KITAGAWA^{*4}, Hiroyuki KIDO, Kyu-Sung KIM,
Nozomu NAKAMURA and Masaya AISHIMA^{*4} Department of Mechanical Engineering Science, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

The flame propagating into the lean region of the stratified mixture below the lower flammability limit was supported by the burned gas behind it. In this study, the effects of the flame stretch on this supported flame was investigated numerically. The supported flame and the burned gas behind it were linked to the counterflow flame configuration of the lean mixture and the hot nitrogen. The results show that the flame stretch deteriorates the reaction of the supported flame. The production of CO and unburned hydrocarbons increases with increasing the flame stretch rate. Moreover, the self-sustaining flame in the flammable range turns into the supported flame by the intense stretch.

Key Words: Internal Combustion Engine, Fuel Injection, Flammability Limit, Stratified Charge, Supported Flame, Flame Stretch, Counterflow Flame

1. まえがき

火花点火機関において、筒内へ燃料を直接噴射する成層給気方式は、希薄燃焼を実現するための有効な手段である⁽¹⁾⁽²⁾。この方式においては、火炎は燃料濃度勾配を有する成層混合気中を伝播する。従って、この方式の更なる改善には、この成層混合気中の火炎伝播特性を明らかにすることが重要である。

様々なスケールで複雑に成層化された場においては、過濃、希薄領域の混在による triple flame や edge flame の出現^{(3)~(10)}とそれら希薄および過濃火炎の相互作用や、secondary flame^{(11)~(14)}の出現などと合わせて複雑な燃焼場になっているものと考えられる。

著者らもこれまでに、成層混合気において火炎がどのように成層混合気中を伝播するのかを明らかにしてきた^{(12)~(16)}。そのうち、前報では⁽¹⁵⁾、希薄領域への火

炎伝播を調べるために、可燃限界以下の希薄予混合給気中に気体燃料を噴射する実験を行った。その結果、燃料噴流内で形成された火炎は、希薄可燃限界以下の濃度の領域にもある程度伝播した後、消滅することが明らかとなった。また、希薄混合気の濃度が高いほど、火炎が伝播する希薄混合気の領域は、広いことが明らかとなった。

燃料濃度の高い領域で形成された火炎は、可燃限界以下の希薄領域に達した後も、火炎背後からの熱およびラジカル等の拡散などによる火炎維持(back-support)効果⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を受けて、ある期間伝播するものと考えられる。そして、その火炎の慣性(flame inertia)⁽¹⁷⁾が、伝播中の希薄混合気の濃度が高いほど減衰していくために、火炎背後から維持された火炎(supported flame)⁽¹⁷⁾は長期間維持され伝播し続けるものと考えられる。ここでは、このような火炎を、維持火炎と呼ぶ⁽¹⁶⁾。

成層混合気中の火炎の特性については、対向流予混合火炎を用いた研究^{(15)~(17)(19)(20)}がなされている。著者らは前報⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾において、可燃混合気中に形成された火炎(self-sustaining flame)⁽²¹⁾の希薄領域への伝播を、濃度勾配の方向に伝播する火炎およびその背後の燃焼

* 原稿受付 2003年9月22日。

^{*1} 正員、九州大学大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。^{*2} 正員、九州大学大学院工学府。^{*3} 九州大学大学院工学府。

E-mail: toshi@mech.kyushu-u.ac.jp

ガスと前方にある希薄混合気の相互作用としてとらえ、希薄混合気と高温窒素、燃焼ガスあるいは可燃範囲内にある当量比の混合気を対向させる数値計算を行った。そして、燃料の反応速度など、この維持火炎の特性について検討を行った。

一方、予混合火炎および拡散火炎とも、燃焼速度、着火、消炎など、火炎には火炎伸長が大きな影響を及ぼすため、多くの研究がなされており^{(4)~(6),(22)~(25)}、維持火炎についてもその影響があるものと考えられる。また、乱流火炎においては、乱れによる火炎伸長の影響は重要である⁽²⁶⁾。そして、対向流火炎は、これら火炎伸長の影響を調べるために有用である⁽²²⁾。

そこで、本研究では、希薄混合気と高温窒素を対向させた場合に希薄予混合気中に形成される維持火炎において、その特性に及ぼす火炎伸長の影響について数値計算により検討を行った。ここでは、希薄混合気と高温窒素の噴出速度を変えることにより、火炎伸長率を変化させた。そして、各成分の反応速度や熱発生率などを調べ、維持火炎の特性に及ぼす火炎伸長の影響について検討を行った。

2. 対向流予混合火炎の数値計算方法

希薄予混合気中の形成される維持火炎について検討を行うために、希薄可燃限界以下のプロパン-空気予混合気と高温窒素とを組み合わせ、図1に示すような対向流予混合火炎の計算を行った。

Fig. 1 Counterflow flames

Table 1 Calculation conditions

Opposing gas	Lean mixture
N_2 gas $T_{OP}=1500, 2000, 2270, 2500, 2800\text{K}$	Propane-air mixture $\phi=0.13, 0.27, 0.40, 0.47, 0.54, 0.67$ $T_L=293\text{K}$
$L=2\text{cm}$ $u_0=50, 100, 200, 300\text{cm/s}$	

混合気組成を表1に示す。希薄混合気は、当量比 ϕ を0.13から0.67までとし、混合気温度 T_L は293Kとした。これに対向させた高温窒素の温度 T_{OP} は、1500から2800Kまでの範囲で変化させた。このうち、 $T_{OP}=2270\text{K}$ は、断熱平衡計算より求めた当量比1.0のプロパン-空気予混合気の燃焼ガス温度である。

ガス噴出口間隔 L は2cmとした。また、ふたつの噴出口におけるガスの噴出速度は等しく u_0 とし、50, 100, 200 および 300cm/sとした。

火炎伸長率 α には、火炎の予熱域前方における最大の速度勾配を用いた⁽²⁷⁾。このときの α の値は、 ϕ や T_{OP} により異なるが、ガスの密度を考慮せずに $2u_0/L$ より見積もった値の約1.3倍となった。

計算には、OPPDIF⁽²⁸⁾コードとLawらのC3までを含む詳細反応機構⁽²⁹⁾を用いた。用いた反応機構の妥当性を検証するために、PREMIX⁽²⁸⁾コードによる一次元平面火炎の計算を行った結果、層流燃焼速度は、従来の測定結果^{(30),(31)}とほぼ一致することが確認されている⁽¹⁶⁾。

3. 対向流予混合火炎の数値計算結果および考察

希薄混合気中に形成された維持火炎における各成分の反応速度や熱発生率などに及ぼす火炎伸長の影響を調べた。

3.1 燃料の反応速度 まず、各素反応におけるプロパンの反応速度より、プロパンの反応速度 $\omega_{C_3H_8}$ を求めた。つぎに、これらを対向流中心軸に沿って希薄混合気および対向ガスの両出口間で積分を行い、プロパンの反応速度の積分値 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ を求めた。本研究においては、各成分の反応速度は生成される場合を正とするが、プロパンについてのみ、消費される場合を正とした。

図2に、プロパンの反応速度の積分値 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ の、窒素ガス温度 T_{OP} による変化を、 $u_0=50$ および200cm/sの場合について示す。

図2(a)の $u_0=50\text{cm/s}$ の場合、希薄混合気の当量比 ϕ が0.13から0.54の希薄可燃限界以下の濃度においては、対向する窒素の温度 T_{OP} が高くなるにつれて $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ は大きくなる。この火炎は、背後から高温窒素により維持されているものと考えられる。

一方、 $\phi=0.67$ においては、混合気濃度が可燃範囲内にあり⁽³²⁾、自らで伝播可能な火炎⁽²¹⁾であるために、対向する窒素の温度にほとんど依存しなかった。 $u_0=100\text{cm/s}$ の場合も、これと同様の変化を示した。

しかしながら、 $u_0=200$ および300cm/sの場合には、 $\phi=0.67$ においては、 $T_{OP}=1500\text{K}$ での $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ の値が小さ

く、図2(b)に示すように、 $\phi_L = 0.67$ における $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ の T_{OP} による変化は、当量比 ϕ_L が0.13から0.54までのものと同様の变化となった。

図3に、 u_0 を変化させることにより得られた、火炎伸長率 α と $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ の関係を、 $T_{OP} = 1500$ および2270Kの場合について示す。

図3(a)の $T_{OP} = 1500$ Kの場合、当量比 $\phi_L = 0.13$ から0.54においては、火炎伸長率 α の増大とともに、プロパンの反応速度 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ はわずかながら大きくなっている。

しかしながら、 $\phi_L = 0.67$ においては、火炎伸長率の増大につれて小さくなった。特に $\alpha = 130$ と 260s^{-1} の間で、 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ は大幅に減少する。 $\phi_L = 0.67$ についてのみ、 u_0 を小刻みに変化させて調べたところ、図に示すように、 $\alpha = 185\text{s}^{-1}$ 付近において、ステップ状に $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ の値が変化した。

ふたつの噴口より、ともに温度293K、当量比0.67の混合気を噴出速度 $u_0 = 200\text{cm/s}$ で対向させた場合には、火炎は伸長により消滅した。このときの $2u_0/L$ により見積もられる火炎伸長率は、 200s^{-1} である。このことから、可燃範囲内の燃料濃度である混合気においては、火炎背後からの火炎維持効果を受けていない場合には、

強い火炎伸長を受けると火炎は消滅するが、高温窒素による火炎維持効果を受けている場合には、消滅せずに維持火炎の形態に移行するものと考えられる。

$T_{OP} = 2000$ K以上の場合も、当量比 $\phi_L = 0.13$ から0.54においては、プロパンの反応速度 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ は $T_{OP} = 1500$ Kの場合と同様の变化を示した。しかしながら、 $\phi_L = 0.67$ においては、 $T_{OP} = 2000$ Kの場合には、 $\alpha = 130\text{s}^{-1}$ 以上においても $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ は急激に小さくなることはなかった。そして、 $T_{OP} = 2270$ K以上では、図3(b)に示すように、 $\phi_L = 0.67$ の場合には、火炎伸長率の増大につれて、変化量は小さいものの、 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ は一度小さくなったのち大きくなっている。

混合気の噴出速度を大きくすると、燃料の流量も増す。プロパンの反応速度 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ を、単位流量あたりの値に換算し、 $M_{C_3H_8} \Sigma\omega_{C_3H_8} / Y_{C_3H_8} \rho u_0$ として、 $T_{OP} = 1500$ および2270Kの場合を図4に示す。ここで、 $M_{C_3H_8}$ はプロパンの分子量、 $Y_{C_3H_8}$ は混合気中のプロパンの質量分率である。

どの温度においても、これらの場合と同様に、すべての当量比 ϕ_L とも火炎伸長率の増大とともに、プロパンの反応速度は単調に減少した。

(a) $u_0 = 50\text{cm/s}$

(b) $u_0 = 200\text{cm/s}$

Fig. 2 Variations of overall reaction rate of fuel, $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ with opposing gas temperature, T_{OP}

(a) $T_{OP} = 1500\text{K}$

(b) $T_{OP} = 2270\text{K}$

Fig. 3 Variations of overall reaction rate of fuel, $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ with flame stretch rate, α

以上より、希薄混合気の当量比 ϕ が0.13から0.54の希薄可燃限界以下の燃料濃度において、高温の窒素からの熱により維持されている火炎は、火炎伸長の影響を受けていることが明らかとなった。

$\phi=0.67$ においては、燃料濃度が可燃範囲内にあることから、火炎伸長率が小さい場合には、対向するガスの温度にも依存せず、火炎は自らで維持している。しかしながら、火炎伸長率が大きくなると維持火炎の形態に移行し、 $\phi=0.54$ 以下のときと同様に、対向する窒素の温度および火炎伸長率への依存性を示すようになることが明らかとなった。

$T_{OP}=1500\text{K}$ の場合に、 $\phi=0.67$ において自らで伝播可能であった火炎が、火炎伸長により維持火炎の形態に移行すると、火炎の位置にもその変化が認められた。

ここでは、プロパンの反応速度 $\omega_{C_3H_8}$ が最大となる位置を火炎の位置とし、よどみ点から火炎までの距離を図5に示す。火炎は、符号が正の場合によどみ点よりも希薄混合気側にあり、負の場合は高温窒素側に位置する。

図5(a)に示す $T_{OP}=1500\text{K}$ の場合には、希薄混合気の当量比 ϕ が0.13から0.54においては、全ての火炎伸長

率 α において、火炎はよどみ点よりも後方、つまり対向する高温窒素側にある。

$\phi=0.67$ の場合には、火炎伸長率 α が小さいときは、火炎は希薄混合気側にあるが、 $\Sigma\omega_{C_3H_8}$ の値がステップ状に変化する $\alpha=18\text{s}^{-1}$ 以上では、当量比 ϕ が0.54以下の場合と同様に、火炎の位置が対向する窒素側に移動する。

また、これらの火炎は、図5(b)のように、対向窒素の温度が高い場合には、希薄混合気上流側に位置する。維持火炎は、対向する窒素の温度に依存している⁽¹⁶⁾。

このことから、可燃範囲内の $\phi=0.67$ においても、強い火炎伸長を受けることにより、維持火炎の形態に移行しているものと考えられる。

また、このような、よどみ点よりも後方に位置する火炎は、自ら維持、伝播する火炎ではないものの、負の燃焼速度^{(3),(19)}をもつことになる。

3.2 維持火炎での反応および熱発生率 つぎ

に、これら高温窒素に維持された火炎での反応の特性を検討するために、一酸化炭素の反応速度について調べた。TakenoとNishioka⁽³³⁾によるEI(Emission Index)と同様に、COの反応速度の積分値 $\Sigma\omega_{CO}$ とプロパンの反応

Fig. 4 Variations of normalized overall reaction rate of fuel, $M_{C_3H_8} \Sigma \omega_{C_3H_8} / Y_{C_3H_8} \rho_0 u_0$ with flame stretch rate, α

Fig. 5 Relative locations of flame from stagnation point

(a) $T_{OP}=1500K$ (b) $T_{OP}=2270K$ Fig. 6 Ratios of overall reaction rate of CO to fuel, $\Sigma\omega_{CO} / \Sigma\omega_{C3H8}$

速度の積分値 $\Sigma\omega_{C3H8}$ との比を求めた。

図6(a)および(b)に、それぞれ $T_{OP}=1500$ および $2270K$ の場合を示す。対向する窒素の温度 T_{OP} が $2000K$ 以上の場合には、図6(b)に示すように、火炎伸長率の増大につれて、どの当量比 ϕ_L においても $\Sigma\omega_{CO} / \Sigma\omega_{C3H8}$ の値は大きくなっている。ここには示していないが、 CO_2 については、 $\Sigma\omega_{CO_2} / \Sigma\omega_{C3H8}$ の値は小さくなった。

これらより、火炎伸長率の増大につれて、プロパンの酸化反応が完全に行われず、燃料の消費量に対する一酸化炭素の生成される割合が大きくなったものと考えられる。Yamaoka と Tsuji⁽²¹⁾は、可燃限界以下の火炎においては、燃焼反応が完結しないとしている。

一方、図6(a)に示す $T_{OP}=1500K$ の場合には、希薄混合気の当量比 ϕ_L が 0.13 から 0.47 の場合、 $\Sigma\omega_{CO} / \Sigma\omega_{C3H8}$ の値は、火炎伸長率の増大につれて一度増加するものの、その後やや減少している。これは、対向する窒素の温度が低く火炎維持効果が小さいために、火炎伸長の影響を大きく受け、プロパンが一酸化炭素にまでも酸化されないためと考えられる。これらの場合、 $(\Sigma\omega_{CO_2} + \Sigma\omega_{CO}) / \Sigma\omega_{C3H8}$ の値は、プロパンの化学量論式

(a) $T_{OP}=1500K$ (b) $T_{OP}=2270K$ Fig. 7 Variations of overall heat release rate, $\Sigma\omega_Q$ with flame stretch rate, α

におけるプロパンと二酸化炭素の分子数の比である 3 よりかなり小さく、 2 程度である。

このような場合には、エチレンなどの未燃炭化水素成分が多く残されていた。

対向流中心軸に沿った両出口間での熱発生率の積分値 $\Sigma\omega_Q$ を、図7に示す。 $T_{OP}=1500K$ の場合、プロパンの反応速度 $\Sigma\omega_{C3H8}$ は、図3(a)に示すように当量比 $\phi_L=0.13$ から 0.54 においては、火炎伸長率 α の増大とともにわずかながら大きくなっている。しかしながら、熱発生率 $\Sigma\omega_Q$ は、図7(a)に示されるように、火炎伸長率 α の増大につれて、わずかながらではあるが減少している。

反応により消費されるプロパンの量は、混合気流量の増加につれて増すものの、火炎伸長の増大により完全には酸化されないために、熱発生率が減少しているものと考えられる。このことから、 $T_{OP}=1500K$ の場合には燃焼反応が完結していないことがわかる。 $T_{OP}=2270K$ の場合には、 $\Sigma\omega_{CO} / \Sigma\omega_{C3H8}$ の値は大きいものの、熱発生率 $\Sigma\omega_Q$ は、図7(b)に示されるように、火炎伸長率 α に対して図3(b)の $\Sigma\omega_{C3H8}$ と同様に变化した。

4. 結 論

成層混合気中を希薄領域へ伝播する火炎を、火炎およびその背後の燃焼ガスと前方にある希薄混合気の相互作用としてとらえ、可燃限界以下の希薄予混合気へ高温窒素を対向させる対向流予混合火炎の数値計算を行い、成層混合気における希薄領域へ伝播する火炎の特性に及ぼす火炎伸長の影響を調べた。

その結果、希薄可燃限界以下の濃度の混合気において、背後から高温窒素により維持されている火炎は、火炎伸長の影響を受けていることが明らかとなった。火炎伸長率の増大とともに、プロパンの反応速度はわずかながら大きくなっている。しかしながら、その増加割合は混合気流量の増加割合より小さく、混合気単位流量あたりの反応速度は、火炎伸長により低下している。

また、可燃範囲内の濃度の混合気における火炎については、火炎維持効果が無い場合には消炎するような強い火炎伸長を受けると、維持火炎の形態に移行し、可燃限界以下の維持火炎と同様な火炎伸長率への依存性を示すことが明らかとなった。

さらに、火炎伸長が強いときには、燃焼反応が完結せず、一酸化炭素や未燃炭化水素の生成割合が増大する。

文 献

- Abata, D. and Evans, R.L., *Automotive Engine Alternatives*, Plenum Publishing Corporation, New York, 1987.
- Takagi, Y., A New Era in Spark-Ignition Engines Featuring High-Pressure Direct Injection, *Proc. Combustion Institute*, 27, (1998), 2055-2068.
- Sohrab, S.H., Ye, Z.Y. and Law, C.K., An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame speeds, *Proc. Combustion Institute*, 20, (1984), 1957-1965.
- Tanoff, M., Smooke, M.D., Osborne, R.J., Brown, T.M. and Pitz, R.W., The Sensitive Structure of Partially Premixed Methane-Air vs. Air Counterflow Flames, *Proc. Combustion Institute*, 26, (1996), 1121-1128.
- Lockett, R.D., Boulanger, B., Harding, S.C. and Greenhalgh, D.A., The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame, *Combustion and Flame*, 119, (1999), 109-120.
- Daou, J., Matalon, M. and Liñán, A., Premixed Edge-Flames under Transverse Enthalpy Gradients, *Combustion and Flame*, 121, (2000), 107-121.
- Dold, J.W., Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame, *Combustion and Flame*, 76, (1989), 71-88.
- Librovich, B.V., Makhviladze, G.H., Roberts, J.P. and Yakush, S.E., Numerical Analysis of Laminar Combustion of Fuel Gas Clouds, *Combustion and Flame*, 118, (1999), 669-683.
- Kioni, P.N., Bray, K.N.C., Greenhalgh, D.A. and Rogg, B., Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame, *Combustion and Flame*, 116, (1999), 192-206.
- Peters, N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- Haworth, D.C., Blint, R.J., Cuenot, B. and Poinot, T.J., Numerical Simulation of Turbulent Propane-Air Combustion with Nonhomogeneous Reactants, *Combustion and Flame*, 121, (2000), 395-417.
- Kitagawa, T., Kido, H., Kim, K.S., Deguchi, T. and Yamashita, J., Combustion of Stratified Mixture Formed by Gas Fuel Jet, *Proc. 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*, (2001), 258-264.
- 北川, 城戸, 出口, 山下, 気体燃料噴流による成層混合気中の燃焼特性, *日本機械学会論文集*, 67-658, B (2001), 1549-1554.
- 北川, 気体燃料噴流により形成された成層混合気中の燃焼特性, *エンジンテクノロジー*, Vol. 4, No. 2, (2002), 38-45.
- 北川, 城戸, 金, 藤岡, 気体燃料噴流により形成された成層混合気中における希薄領域への火炎伝播特性, *日本機械学会論文集*, 68-673, B (2002), 2657-2663.
- 北川, 城戸, 金, 藤岡, 成層混合気中を希薄領域へ伝播する火炎の対向流火炎による検討, *日本機械学会論文集*, 69-682, B (2003), 1515-1520.
- Marzouk, Y.M., Ghoniem, A.F. and Najm, H.N., Dynamic Response of Stratified Premixed Flames to Equivalence Ratio Gradients, *Proc. Combustion Institute*, 28, (2000), 1859-1866.
- Ra, Y. and Cheng, W.K., Laminar Flame Propagation through a Step-Stratified Charge, *Proc. 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*, (2001), 251-257.
- Wehmeyer, J.A., Chen, Z., Mosbacher, M., Pitz, R.W. and Osborne, R., Opposed Jet Flames of Rich Premixed Propane-Air Reactants versus Hot Products, *Combustion and Flame*, 128, (2002), 232-241.
- 田上, 江原, 北川, 不均質濃度場における対向流火炎の NO 生成に関する数値計算, *自動車技術会論文集*, 33-4, (2002), 51-56.
- Yamaoka, I. and Tsuji, H., An Experimental Study of Flammability Limit Using Counterflow Flames, *Proc. Combustion Institute*, 17, (1979), 843-855.
- 大塚, 新岡, 対向二次元流バーナにおける定常・一次元拡散炎, *日本機械学会論文集*, 38-310, (1972), 1513-1522.
- Sato, J., Konishi, K., Okada, H. and Niioka, T., Ignition Process of Fuel Spray Injected into High Pressure High Temperature Atmosphere, *Proc. Combustion Institute*, 21, 695-702 (1986).
- 北野, 大塚, 対向流における自発火の研究, *日本機械学会論文集*, 45-400, B (1979), 1902-1911.
- 北川, 城戸, 戸上, 原田, 小川, 層流燃焼速度および Markstein 長さに及ぼす圧力の影響, 第 17 回内燃機関シンポジウム講演論文集, (2002), 309-314.
- 北川, D. Bradley, C.G.W. Sheppard, R. Woolly, 高圧下における予混合気の乱流燃焼特性, *日本機械学会徳島地方講演会講演論文集*, (2000), 243-244.
- Fotache, C.G., Wang, H. and Law, C.K., Ignition of Ethane, Propane, and Butane in Counterflow Jets of Cold Fuel versus Hot Air under Variable Pressures, *Combustion and Flame*, 117, (1999), 777-794.
- Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A., Coltrin, M.E., et al., *CHEMKIN Collection*, Release 3.6, Reaction Design, Inc., San Diego, CA (2000).
- Sung, C.J., Li, B., Law, C.K. and Wang, H., Structure and Sooting Limits in Counterflow Methane/Air and Propane/Air Diffusion Flames from 1 to 5 Atmospheres, *Proc. Combustion Institute*, 27, (1998), 1523-1529.
- Yamaoka, I. and Tsuji, H., Determination of Burning Velocity Using Counterflow Flames, *Proc. Combustion Institute*, 20, (1984), 1883-1892.
- Egolfopoulos, F.N., Zhu, D.L. and Law, C.K., Experimental and Numerical Determination of Laminar Flame Speeds: Mixtures of C_2 -Hydrocarbons with Oxygen and Nitrogen, *Proc. Combustion Institute*, 23, (1990), 471-478.
- Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases* (3rd ed), Academic Press Inc., Orlando, 1987, p. 706.
- Takeno, T. and Nishioka, M., Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions, *Combustion and Flame*, 92, (1993), 465-468.