

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

対向流場に形成されたエッジフレイムの性質に及ぼすルイス数の影響

Effect of Lewis Number on Characteristics of Edge Flame Established in Counterflow Field

滝田 謙一*・望月 宏朗・西脇 渉

TAKITA, Kenichi*, MOCHIZUKI, Hiroaki, and NISHIWAKI, Wataru

東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-1-1
Tohoku University, 6-1-1 Aoba, Aramaki, Sendai 980-8579, Japan

2011年7月11日受付; 2011年10月18日受理/Received 11 July, 2011; Accepted 18 October, 2011

Abstract : The effect of the Lewis number of a mixture on characteristics of the edge flame established in a counterflow field was experimentally investigated. The edge flame was established in a counterflow field with a stretch rate gradient between the inclined counterflow slot-jet burners. A flame edge was generated in the high stretch region where the distance between two burners was small, and twin counterflow flames were stabilized in the low stretch side where the distance between burners was large. The flame shape strongly depended on the Lewis number irrespective of fuel. The local stretch rate at the flame edge of CH_4 mixtures that the Lewis number was nearly unity was influenced by the Lewis number. On the other hand, the local stretch rate at the flame edge of C_3H_8 mixtures that the Lewis number was much larger than unity showed no dependence on the Lewis number. Such a characteristic well agreed with numerical results of extinction behavior of twin counterflow planar flames. A difference between the edge flame and twin counterflow flames appeared in the threshold mole fraction of He in the mixture when the local stretch rate at the flame edge or the extinction stretch rate of twin counterflow flames changed from decreasing trend to increasing trend.

Key Words : Edge flame, Counterflow flame, Lewis number, Stretch rate

1. 緒言

希薄予混合燃焼は自動車ガソリンエンジン、ガスタービン、ガスエンジン等において、低燃費、低排気エミッションの更なる向上を期待できる燃焼形態[1,2]であり、燃料希薄側運転限界を如何に拡大できるかが、現在の燃焼研究における最も重要な研究課題である。希薄火炎は吹き消えが生じやすく、また不安定で振動燃焼が発生することも多いため、その制御は困難を極める。希薄火炎の精密制御を達成するためには、火炎基部の消炎特性をよく把握する必要があると考えられ、火炎端つまりはエッジフレイムに関する研究[3]が多くなされている。著者らも対向流場に伸長率勾配を導入することにより、高伸長率側に火炎端を有するエッジフレイム[4,5]を形成し、その特性を調べてきた[6-9]。これまでの研究において、エッジフレイムの火炎形状やエッジ部伸長率は平面对向流火炎の消炎挙動と同様に混合気の不足成分ルイス数に強く影響を受けることが明らかになっている。本研究で主題としている燃料希薄火炎であ

ば、必然的に燃料ルイス数となる。近年、より高効率な燃焼技術の開発が盛んに行われており、酸素富化燃焼法[10]や高温空気燃焼法[11]などの新しい燃焼法や自動車用エンジンにおける EGR 率の増加等、希薄予混合気中の酸化剤や希釈剤を変化させた研究がなされている。混合気成分の変化は燃料ルイス数をも変化させるため、燃料濃度を希薄に保ったままで火炎に及ぼす燃料ルイス数の影響を調べるのが重要となる。本研究では、燃料/空気の希薄予混合気中の窒素をヘリウムまたは二酸化炭素に置換することにより、燃料ルイス数を変化させた場合のエッジフレイムの性質を調べた。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略を示す。実験に用いたバーナは出口断面が寸法 10 mm×50 mm の矩形で、厚さの異なる固定治具により傾斜角をつけて対向させた。本研究では上下のバーナから同一組成の予混合気を流出させ、バーナ間隔の大きい低伸長率側では双子火炎、バーナ間隔の小さい高伸長率側に火炎端が形成されるようにした。バーナ内には整

* Corresponding author. E-mail: takita@scrj.mech.tohoku.ac.jp

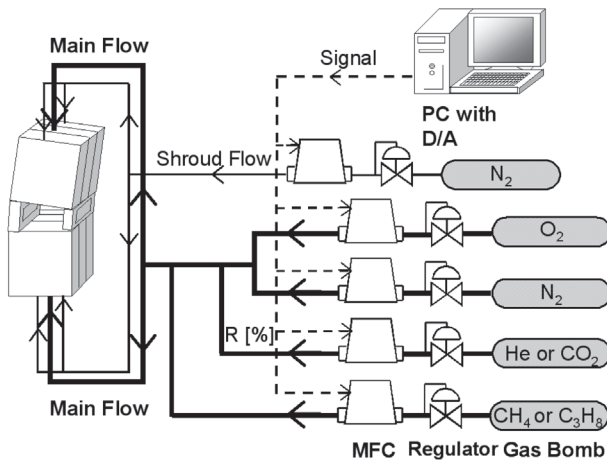


Fig. 1 Experiment setup

流のためガラスビーズおよびハニカムが装入されている。バーナ長手方向の流れは両端に取り付けられた治具により拘束されている。2つのバーナ間の傾斜角 (θ) は 3, 6, 9 度の 3 種類とし、傾斜角によらず右側治具 (高伸長率側) の厚さ (バーナ間距離) は 10 mm となるようにした。上下主流バーナの両側面には外部空気との二次燃焼を避ける目的で副流として窒素を主流と同流速で流した。各ガスの流量はパソコンにより制御されたマスフローコントローラにより調整した。

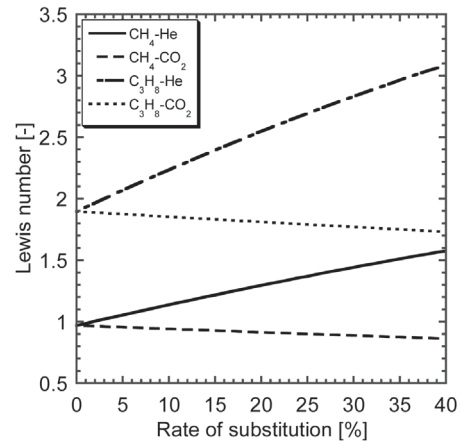
本研究では酸化剤中の窒素をヘリウムまたは二酸化炭素に置換することにより燃料ルイス数を変化させている。酸化剤の組成は次式のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 & [\text{Oxidizer}] \\
 & = 0.21[\text{O}_2] + 0.79 \{ \{ (100-R)/100 \} [\text{N}_2] + R/100 [\text{He or CO}_2] \} \quad (1)
 \end{aligned}$$

上式の $R [\%]$ は置換割合であり、 $R = 0 \%$ は空気となる。

燃料にはメタンとプロパンを使用し、本研究の実験装置、実験条件で安定な火炎が得られる最小の当量比で実験を行った。それぞれの混合気の当量比を 0.54, 0.57 とした場合の燃料ルイス数を図 2 に示す。燃料ルイス数の算出には CHEMKIN [12] のデータベースを利用した。置換なしの場合、メタン混合気の燃料ルイス数は 1 よりわずかに小さく、プロパン混合気の燃料ルイス数は 1 よりかなり大きい。ヘリウムの増加は混合気の熱拡散率を増大させるため燃料ルイス数は増加し、逆に二酸化炭素の増加は混合気の熱拡散率、燃料ルイス数の減少をもたらす。メタン混合気にヘリウムを添加する場合のみルイス数が 1 をまたぐことになる。

各条件において形成された火炎を CCD カメラで撮影し、画像からそれぞれの条件におけるエッジ部の伸長率を求めた。エッジ部の伸長率 $S_E [1/s]$ はバーナ出口流速 $U [m/s]$ 、エッジ部でのバーナ間隔 $d_E [m]$ を用いて次式で定義され


 Fig. 2 Lewis numbers of mixtures ($\phi=0.54$ for CH_4 mixtures and $\phi=0.57$ for C_3H_8 mixtures)

る。このエッジ部伸長率はバーナ長手方向にはエッジ部局所の値であるが、対向バーナ軸方向には局所ではなくグローバル伸長率である。

$$S_E = 2U/d_E \quad (2)$$

3. 実験結果および考察

3.1. 火炎エッジ部形状

図 3 に当量比 0.54 のメタン予混合気に対して窒素のヘリウム置換率を増加させた時の火炎形状の変化を示す。図は火炎からの自発光の相対的な輝度値分布を示している。図下部のスケールはバーナ長手方向の幅 (50 mm) に対応し、治具は 0 mm, 50 mm の位置に設置されている。火炎の両端にエッジ部が形成されているが、左側部分はバーナ間隔が大きい低伸長率側であり、バーナ治具及びバーナへの熱損失により消炎している。一方、火炎右端のエッジ部はバーナ間隔の小さい高伸長率側であり伸長による消炎が起きていると考えられ、本研究での考察の対象とする。バーナ傾斜角は 3 度であり、火炎エッジ部がほぼ同じ位置になるようにバーナ出口流速を変化させている。ヘリウムへの置換なしの場合、ルイス数は 1 より小さく、双子火炎の部分は 2 枚の火炎がかなり接近している。ヘリウムの置換割合を増加させると双子火炎の部分は火炎間隔が増大していく。ヘリウムの置換割合の増加に伴いルイス数は 1 を超え、火炎形状は著者らが過去に報告 [6,8] しているプロパン/空気希薄予混合気のエッジフレイムと同じ形状となった。また、ヘリウムの置換を行わない場合にはエッジ部での輝度が双子火炎の部分に比べて大きい、ヘリウムの置換率の増加により、双子火炎部分との明確な差は見られなくなった。

プロパン予混合気に対して窒素をヘリウムに置換した場合の火炎形状を図 4 に示す。ヘリウムへの置換割合が増加するにつれて、双子火炎部分の火炎間隔がわずかに増大す

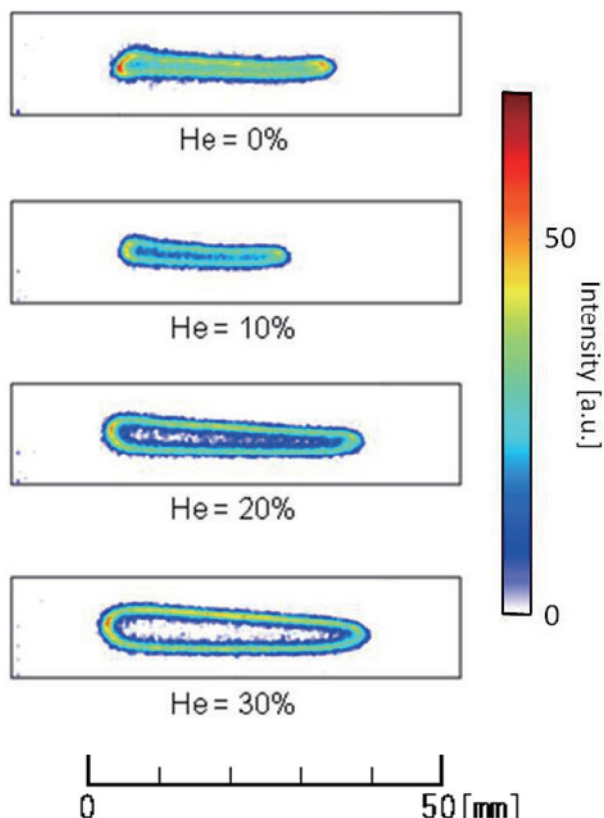


Fig.3 Dependence of flame shape of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{He}$ mixture on substitution ratio of He

る傾向は見られるものの、メタン混合気に対して火炎形状の変化は小さい。またヘリウムの置換割合によらず、エッジ部の輝度は双子火炎部分よりも小さく、エッジ部で双子火炎が離れて消失しているように見える。この傾向は既に報告しているプロパン/空気希薄混合気のエッジフレームの性質[6,8]と一致する。プロパン混合気の場合、ヘリウムへの置換なしの場合でレイ数 Re が約1.8とかなり大きく、メタン混合気に対するヘリウム置換のように1をまたぐような変化ではないため、レイ数の効果は相対的に小さい。

メタン混合気の窒素を二酸化炭素に置換した場合はレイ数が減少し、置換量の増大に伴い双子火炎部分がより近づく傾向を示した。置換割合が大きくなると火炎が波打ち、置換割合19%においてセル状火炎に移行した。図5には、その時の火炎形状を示す。これは二酸化炭素の割合の増加が混合気のレイ数を減少させ、1よりかなり小さくなり拡散・熱的不安定性が強く現れたためである。一方、プロパン混合気に対する二酸化炭素割合の増加は燃料レイ数の減少をもたらすにも関わらず、双子火炎部分の間隔が増大した。図6にプロパン予混合気の窒素を20%二酸化炭素に置換した場合の火炎形状を示す。レイ数の効果よりも次節で示す二酸化炭素の置換による火炎の弱化機構が強く反映した結果となった。

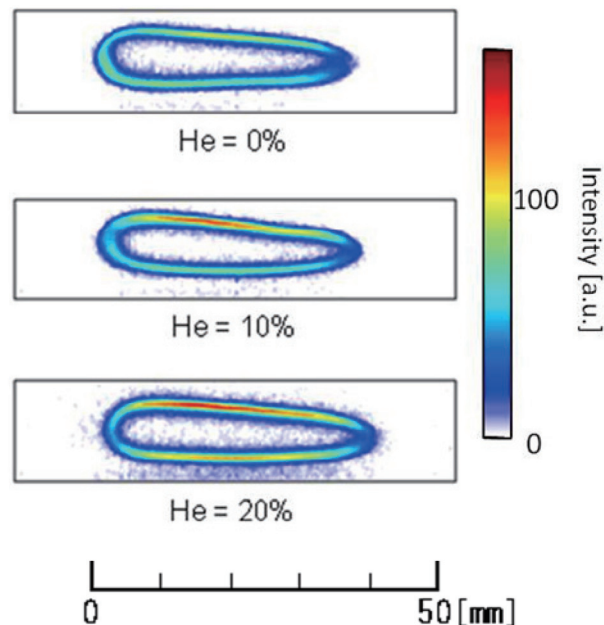


Fig.4 Dependence of flame shape of $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{He}$ mixture on substitution ratio of He

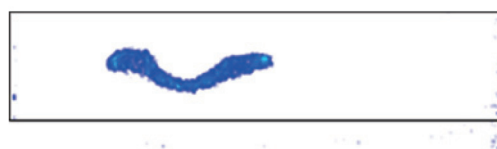


Fig.5 Cellular flame of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ mixture ($R=19\%$)

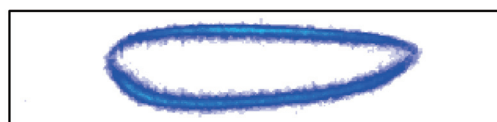
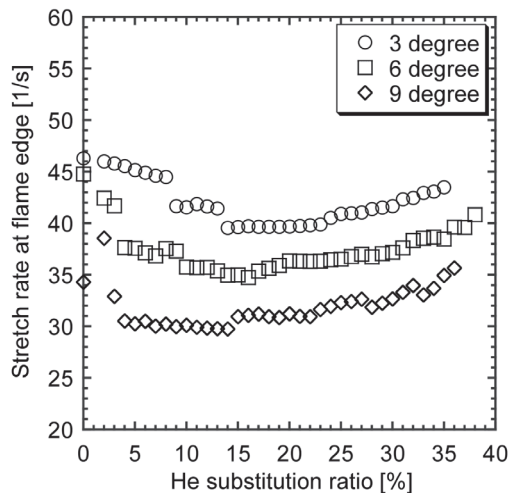
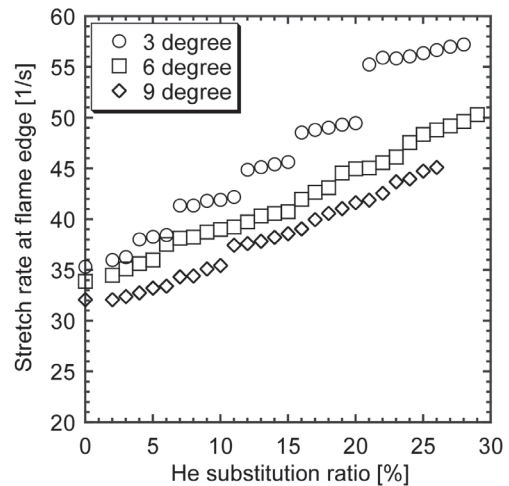
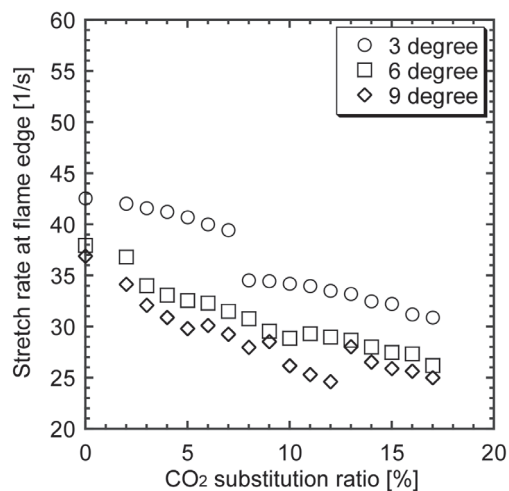


Fig.6 Flame shape of $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ mixture ($R=20\%$)

3.2. 当量比を一定にした条件でのエッジ部局所伸長率

当量比0.54のメタン予混合気中の窒素をヘリウムまたは二酸化炭素に置換してレイ数を変化させた場合のエッジ部伸長率を計測した。図7はヘリウム置換の場合、図8は二酸化炭素置換の場合の結果である。ヘリウム置換の場合、エッジ部伸長率はバーナ傾斜角によらず、ヘリウムの置換割合の増加に伴い、減少から増加に転じる傾向を示した。置換なしのメタン予混合気のレイ数は1より小さく、その場合、レイ数効果により火炎が強化されることが知られている[13-15]。ヘリウムの添加によりレイ数は増加し1を超えるため、レイ数効果による火炎強化作用が消失していく。一方、ヘリウムの置換割合の増加は混合気の熱拡散率を増加、熱容量を減少させ燃焼速度、断熱火炎温度の増加をもたらす火炎を強化する。それらの火炎の弱化お


 Fig. 7 Effect of substitution ratio of He in $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{He}$ mixture on stretch rate at flame edge

 Fig. 9 Effect of substitution ratio of He in $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{He}$ mixture on stretch rate at flame edge

 Fig. 8 Effect of substitution ratio of CO_2 in $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ mixture on stretch rate at flame edge

よび強化機構の競合により, エッジ部伸長率が減少から増加に転じる傾向を示したと考える。これに対して, 図 8 の二酸化炭素置換の場合, 置換割合の増加に伴い, エッジ部伸長率は単調に減少している。二酸化炭素置換の場合, 混合気のルイス数が 1 をまたぐことはなく, 二酸化炭素の増加に伴い単調に減少する。一方, 二酸化炭素の置換割合の増加は混合気の熱拡散率を減少, 熱容量を増加させ燃焼速度, 断熱火炎温度の低下をもたらす。エッジ部伸長率が単調減少を示した結果から, ルイス数効果よりも火炎の弱化機構が支配的であることがわかった。

図 9 にプロパン予混合気の窒素をヘリウムに置換した場合のエッジ部伸長率の変化を示す。プロパン予混合気に対してはヘリウムの置換割合の増加に伴い, エッジ部伸長率は単調増加, 二酸化炭素の置換割合の増加に伴い単調減少となり, メタン予混合気へヘリウムを添加した場合のような複雑な傾向は見られなかった。プロパン予混合気の場合

は混合気のルイス数は全条件において 1 よりかなり大きく, ルイス数の変化よりも置換による燃焼速度, 断熱火炎温度を介した火炎の強化/弱化機構の効果が強く反映された結果となった。

全ての条件においてバーナ傾斜角が小さいほどエッジ部伸長率は大きくなっており, この結果はこれまでの著者らの結果[6,7,9]と同様である。火炎形状の観察によりバーナ傾斜角が減少するとエッジ部での火炎曲率が增大することが明らかであり, エッジ部における火炎曲率の効果[16,17]がバーナ傾斜角への依存性の一因であると考えられる。

3.3. 断熱火炎温度を一定にした条件でのエッジ部局所伸長率

前節で示したように, ヘリウムまたは二酸化炭素の置換はルイス数の変化に加えて, 燃焼速度や断熱火炎温度の変化も伴うことになる。ルイス数の変化の影響のみを抽出するため, 断熱火炎温度を一定にした条件でのエッジ部伸長率の計測を行った。断熱火炎温度は CHEMKIN パッケージの PREMIX [12] を用いて計算した。各置換割合における断熱火炎温度がメタン予混合気に対しては置換なしの場合の当量比 0.54 の値, プロパン予混合気に対しては置換なしの場合の当量比 0.57 の値になるように混合気の当量比を変化させた。図 10 は置換なしの場合の値で規格化したメタン予混合気のエッジ部伸長率を示す。ルイス数が 1 より小さいデータは二酸化炭素置換に, 1 より大きいデータはヘリウム置換に相当する。図から, エッジ部伸長率がルイス数に対して負の相関を持つことがわかる。図 8 のエッジ部伸長率の結果に見られるようにルイス数効果が相対的に小さいと考えられるルイス数が 1 より小さい混合気に対しても, ルイス数への依存性が現れていることは興味深い。一方, 図 11 は同様な規格化を施したプロパン予混合気のエッジ部伸長率を示す。ルイス数が 1 よりはるかに大きいプロパン予混合気の場合は, ルイス数への依存性はほとんどないことがわかった。

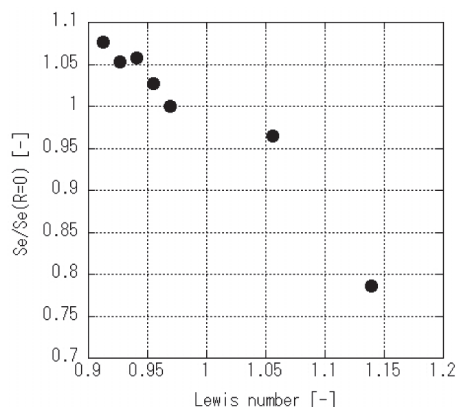


Fig.10 Effect of Lewis number of mixture on stretch rate at flame edge of CH₄ mixture under constant adiabatic flame temperature

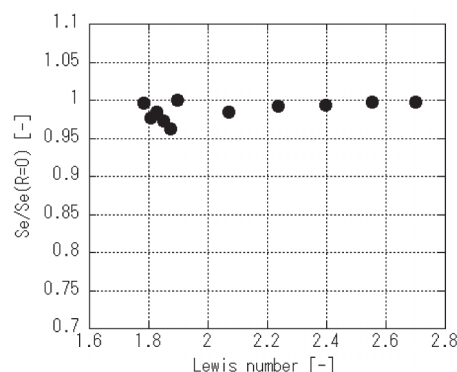


Fig.11 Effect of Lewis number of mixture on stretch rate at flame edge of C₃H₈ mixture under constant adiabatic flame temperature

本節では、火炎エッジ部の形成、挙動に対しては熱損失が重要な因子であると考え、当量比を変化させて断熱火炎温度一定の条件で比較を行った。しかし、当量比の変化は燃焼速度を変化させることになる。今後、燃焼速度を一定にした条件でも比較を行い、火炎の伝播性と熱損失のどちらが火炎エッジ部の挙動に支配的となるのかを考察する必要がある。

3.4. 平面对向流火炎の消炎挙動との比較

本研究で形成されるエッジフレームのバーナ長手方向への形状変化は、平面对向流火炎においてバーナ出口流速の増加に伴い火炎間隔が減少し、やがて消炎に至るプロセスに対応していると考えられる。本節では、平面对向流火炎の消炎伸長率を一次元解析により算出し、そのルイス数への依存性をエッジフレームのエッジ部伸長率の傾向と比較する。平面对向流火炎の消炎の計算には CHEMKIN パッケージの PREMIX を対向流用に改良したコード[18]を用い、反応機構には GRI-Mech. Ver.3.0 [19] を用いた。著者らのこれまでの研究[20-22]により、それらの計算結果が平面对向流火炎の消炎伸長率の実験結果を定性的によく再現することを確認している。

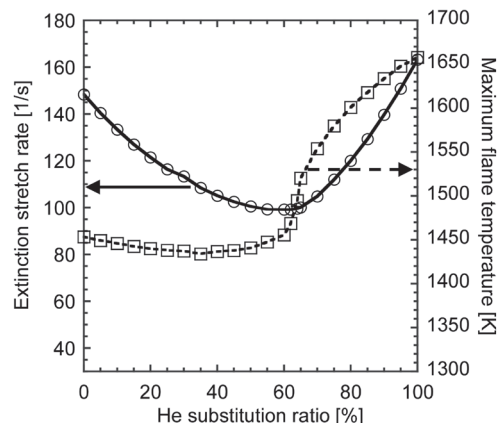


Fig.12 Effect of substitution ratio of He in CH₄/O₂/N₂/He mixture on extinction stretch rate and the maximum flame temperature of twin counterflow flames

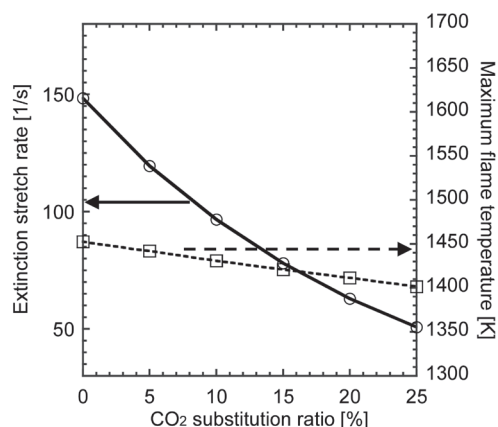


Fig.13 Effect of substitution ratio of CO₂ in CH₄/O₂/N₂/CO₂ mixture on extinction stretch rate and the maximum flame temperature of twin counterflow flames

図 12 は当量比 0.54 のメタン予混合気の窒素をヘリウムで置換した場合の置換割合と消炎伸長率、最大火炎温度の関係を示す。図 7 に示したエッジ部伸長率の結果と同様、消炎伸長率は最小値をとり、減少から増加に転じる傾向となった。しかし、消炎伸長率が最小値を取る置換割合は約 60 % であるのに対して、図 7 でエッジ部伸長率が最小値を取るのは置換割合が 10 から 20 % 付近であった。この差異はそれぞれの火炎形状の違い、つまりは熱損失機構の違いに起因すると考える。対向流双子火炎では火炎面背後は断熱条件が与えられており、熱損失は存在しないが、エッジフレームの火炎端部では放射状に熱損失が生じている。著者らの実験[6]および数値計算[8]において、平面双子火炎の消炎伸長率に対して、同一混合気のエッジフレームのエッジ部伸長率はメタン、プロパン混合気共に 0.6 から 0.7 倍程度の値であることが示されている。

図 13 は当量比 0.54 のメタン予混合気の窒素を二酸化炭素で置換した場合の置換割合と消炎伸長率、最大火炎温度の関係である。二酸化炭素置換に対する消炎伸長率、最大

火炎温度の変化は置換割合の増加に伴い単調減少を示し、図 8 のエッジ部伸長率の変化と一致した。また、プロパン予混合気に対してもヘリウムの置換割合の増加は消炎伸長率の単調増加を、二酸化炭素の置換割合の増加は消炎伸長率の単調減少をもたらした。それらの結果はプロパン予混合気のエッジフレイムのエッジ部伸長率と同様な結果であった。

4. 結論

燃料ルイス数が 1 に近い希薄メタン予混合気のエッジフレイムのエッジ部伸長率はルイス数の影響を強く受け、ルイス数に対して負の相関を持つことが分かった。一方、燃料ルイス数が 1 よりはるかに大きい希薄プロパン予混合気のエッジ部伸長率はルイス数の影響を受けない。また、エッジ部伸長率のヘリウムまたは二酸化炭素置換に対する変化は平面对向流火炎の消炎伸長率の変化に定性的には一致するが、メタン混合気に対するヘリウム置換における減少から増加傾向に転じる置換割合は異なった。これは熱損失機構の違いに起因すると考えられる。

謝辞

本研究にご助言頂いた東北大学 升谷五郎教授、河内俊憲助教に感謝します。

References

1. Kaneko, M., Morikawa, K., Itoh, J., Saishu, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan*, 44: 11-18 (2002) (in Japanese).
2. Sakurai, T., *Journal of the Combustion Society of Japan*, 44: 19-24 (2002) (in Japanese).
3. Buckmaster, J., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 28: 433-475 (2002).
4. Shay, M. L. and Ronney, P. D., *Combust. Flame*, 112: 171-180 (1998).
5. Liu, J. B., and Ronney, P. D., *Combust. Sci. Technol.*, 144: 21-46 (1999).
6. Takita, K., Sakaguchi, S., Masuya, G., *Combust. Flame*, 132: 343-351 (2003).
7. Takita, K., Sado, M., Masuya, G., Sakaguchi, S., *Combust. Flame*, 136: 364-370 (2004).
8. Cho, S. J., Takita, K., *Combust. Flame*, 144: 370-385 (2006).
9. Takita, K., Hosokawa, J., Mochizuki, H., *Journal of the Combustion Society of Japan*, 52: 139-145 (2010) (in Japanese).
10. Kishimoto, M., Zhao, D., Yamashita, H., *JSME Trans. B*, 68: 1578-1585 (2002) (in Japanese).
11. Niioka, T., *Proc. Fifth ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, AJTE99-6301 (1999).
12. Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D., Miller, J.A., Sandia National Laboratories Report, SAND85-8240 (1985).
13. Ishizuka, S. and Law, C.K., *Proc. Combust. Inst.*, 19: 327-335 (1982).
14. Tsuji, H., and Yamaoka, I., *Proc. Combust. Inst.*, 19: 1533-1540 (1982).
15. Sato, J., *Proc. Combust. Inst.*, 19: 1541-1548 (1982).
16. Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., Addison-Wesley, Pub., Redwood City, CA, 1985.
17. Asato, K., Kawamura, T., Ban, T., *Proc. Combust. Inst.*, 22: 1509-1515 (1988).
18. Ju, Y., Guo, H., Maruta, K., Liu, F., *J. Fluid Mech.*, 342: 315-339 (1997).
19. Smith, G.P., Golden, D.M., Franklach, M., Moriarty, N.W., Eiteeneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner Jr., W.C., Lissianski, V.V., Qin, Z., GRI-Mech 3.0 (1999), URL: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
20. Takita, K., Yamazaki, H., Uchida, T., Masuya, G., *Combust. Sci. and Tech.*, 178: 1649-1668 (2006).
21. Takahashi, K., Pramoonjaggo, P., Takita, K., *Combust. Sci. and Tech.*, 181: 1065-1077 (2009).
22. Takita, K., Morinaga, A., Someya, T., *Proc. Combust. Inst.*, 33: 1179-1186 (2011).