

■原著論文／ORIGINAL PAPER■

高圧における CO₂ 添加対向流予混合火炎の消炎Extinction of Counterflow Premixed Flame Containing CO₂ under High Pressure滝田 謙一^{1*}・柴田 真宏²・山崎 裕之¹・升谷 五郎¹TAKITA, Kenichi^{1*}, SHIBATA, Masahiro², YAMAZAKI, Hiroyuki¹, and MASUYA, Goro¹¹ 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉01
Tohoku University, 01 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan² (株)日野自動車 〒191-8660 日野市日野台3-1-8
Hino Motors Co., Ltd, 3-1-8 Hinodai, Hino, Tokyo 191-8660, Japan

2002年6月17日受付, 2002年10月23日受理 / Received 17 June 2002; Accepted 23 October 2002

Abstract : Effects of CO₂ addition and pressure on an extinction of a counterflow premixed methane/air flame were experimentally investigated. The extinction stretch rate decreased with the mole fraction of CO₂ in the pressure range from 0.1 MPa to 0.5 MPa. Therefore, an enhancement of flame strength by the effect of radiation reabsorption did not appear in such conditions. The increase in atmospheric pressure resulted in an instability of the flame surface, though the increase in the stretch rate had a role which stabilizes the flame surface. The effect of pressure on the extinction stretch rate depended on the flame strength. In the case of flame which extinction stretch rate was relatively low, the increase in the pressure resulted in decrease of extinction stretch rate for mixtures with any Lewis number. However, in the case of flame which extinction stretch rate was relatively high, the extinction stretch rate became constant for different pressure or it increased with the pressure. The reason for this result was considered to be suppression of incomplete combustion in the thin flame under high pressure.

Key Words : Counterflow flame, Radiation reabsorption, Flame stretch, High pressure, Carbon dioxide, Lewis number

1. 緒言

公害ガスの排出を低く抑える燃焼法として、燃焼ガスを希釈剤として再循環させる手法が注目され、その基礎研究[1,2]がなされている。燃焼ガスに含まれるCO₂は吸収係数が大きく、未燃ガスに大量に含まれた場合、輻射再吸収効果が燃焼特性に少なからぬ影響を与えることが考えられる。最近のJu et al.[3]の統計狭域バンド輻射モデルを用いた数値解析によれば、輻射再吸収効果を考慮すると、考慮しない場合より可燃限界が当量比で約0.1から0.2程度拡がり、また、予混合気にCO₂を混合させることにより、混合させない場合よりも燃焼速度が増大する条件が存在することが見出された。しかし、従来、消火剤として用いられてきたCO₂の燃焼促進効果に注目した研究[4]はほとんどない。輻射再吸収効果は吸収距離に強く依存し、燃焼器ス

ケールが大きいほど、また雰囲気圧力が高いほど、その効果は大きいと考えられる。大気圧、通常の実験室レベルの燃焼器では、再吸収効果は無視できる程度であると考えられるが、どの程度の燃焼器スケール、あるいは雰囲気圧力であれば効果が顕著に現れるかは明らかではない。著者は、前報[5]にて0.5 MPaまでの圧力条件でCO₂を0~79%添加した対向流予混合火炎の消炎実験を行い、CO₂添加の効果を調べたが、CO₂割合が増加すれば消炎伸長率も単調に減少し、火炎強化あるいは燃焼促進効果は見られなかった。

前報[5]に続く本研究では、Ju et al.[3]の数値解析において再吸収効果による燃焼促進効果が顕著に現れたCO₂割合の低い燃料希薄火炎に焦点を当て、CO₂添加効果を調べた。また、CO₂の添加は混合気のルイス数を低下させる。圧力が増加し火炎帯が薄くなった場合にルイス数効果の寄与がどの程度変化するのにも興味深い。さらに雰囲気圧力の増加は火炎面の不安定化をもたらすこと[6]が知られている。対向流火炎のような伸長火炎の場合、圧力の上昇による不安定化と伸長によるその抑制が競合すると考えられる。その

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

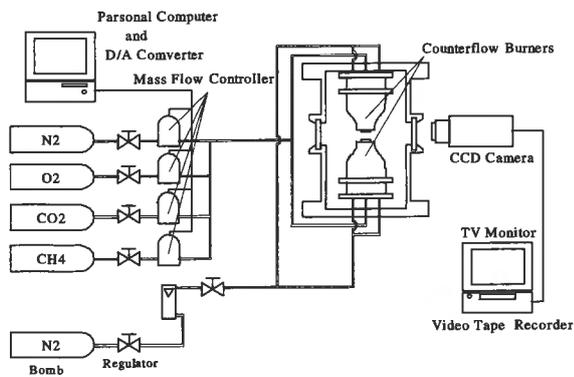


Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

ように興味深い現象を多く含むにもかかわらず、対向流予混合火炎への圧力の影響に関する研究[7,8]は少ない。そこで本研究において、それらの現象についても考察を加える。

2. 実験装置および実験方法

2.1. 実験装置

図1に実験装置の概略図を示す。実験には内径334 mm、高さ580 mm、最大耐圧3.0 MPaの円筒形高压燃焼容器を用い、0.1 MPaから0.5 MPaの圧力範囲で実験を行った。容器内の圧力は、外部に設けられた背圧弁を調整することにより一定値を保った。容器内には上下に対向する一対の円筒形ノズルバーナ(出口径9 mm)が間隔10 mmで設置されている。バーナ内部には整流および逆火防止のため厚さ3 mm、ろ過精度100 μm の真ちゅう製の焼結金属板を挿入してある。主流ノズルの外側にもノズルを設け、副流としてN₂を流すことにより、周囲O₂の影響を防ぐとともに火炎の尾を消している。また、上部バーナの外周には銅管を巻き付け冷却水による冷却を行っている。

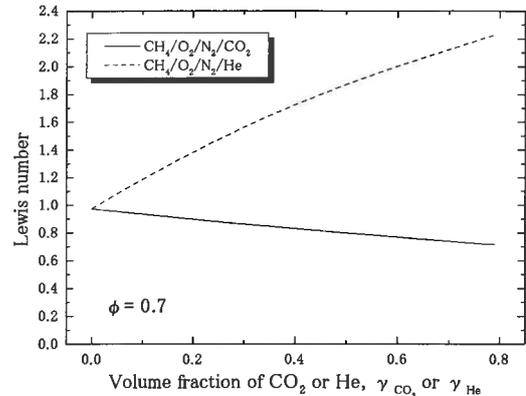
各ガスの流量制御にはサーマルマスフローコントローラ(KOFLOC, 3610 series)(精度2% FS以内)を使用し、DA変換器を介してパーソナルコンピュータにより制御した。予混合気の着火には外部からステッピングモータにより遠隔操作された電熱線を用いた。

2.2. 輻射計測

火炎からの輻射量の計測には、10 mm \times 10 mm、厚さ0.5 mmの輻射センサ(Capteec, RF-10)を上側の主流ノズル内部の焼結金属下面に貼り付けて計測した。センサからの出力電圧を動ひずみ測定器(NEC, AS2102)で増幅後、AD変換器を介しパーソナルコンピュータに取り込んだ。

2.3. 混合気組成

本研究では、燃料に純度99%のCH₄、酸化剤にO₂、希釈剤としてN₂とCO₂又はHeの混合ガスを用いた。本研究では燃料希薄な状態で実験を行っているため、混合気に

Fig.2 Change of Lewis number by addition of CO₂ or He.

対するCH₄のレイス数($Le = a/D_i$; a : 混合気の熱拡散率, D_i : 燃料種の拡散係数)をパラメータとした。熱拡散率の大きなHeは輻射吸収性がなく、レイス数を増加させる働きを持つなどCO₂と逆の性質を持つため、CO₂との比較に用いた。空気の組成を基準として、その空気中のN₂を他の希釈剤で置換した場合の置換割合(γ)を主なパラメータとした。

$$0.21[\text{O}_2] + (0.79 - \gamma)[\text{N}_2] + \gamma[\text{CO}_2 \text{ or He}] \quad (1)$$

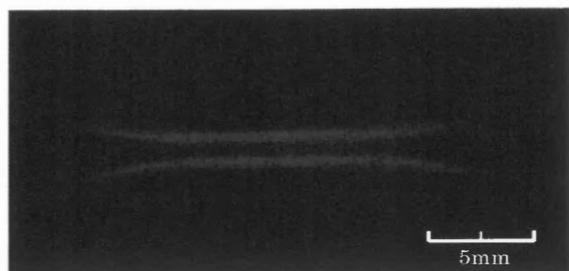
図2には各組成におけるレイス数の変化を示す。CO₂の割合の増加は単調にレイス数の低下をもたらす。Heの割合の増加は単調にレイス数の増加をもたらす。

3. 実験結果および考察

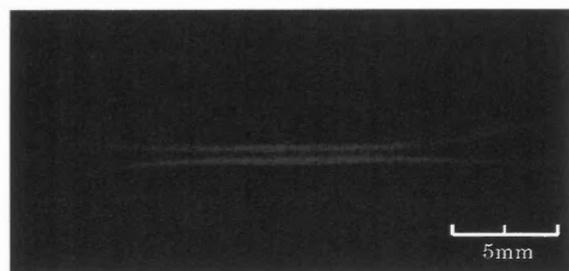
3.1. 火炎形状および消炎挙動に及ぼす圧力の影響

図3には雰囲気圧力が(a)0.1 MPaと(b)0.5 MPaの場合の火炎面の直接写真を示す。圧力の増加により火炎帯は薄くなる。圧力の増加は同時に火炎面の不安定化をもたらす。火炎面が突発的に揺らぐ現象が観察された。この不安定性はDarrieus-Landau不安定性と熱・物質拡散効果による固有不安定性の複合効果であること[6]が知られている。CO₂濃度の増加に伴い、若干不安定性が顕著になる傾向はあるものの、レイス数が1を超えるHe希釈火炎でも不安定性が生じていることより、本実験においてはDarrieus-Landau不安定性が強く影響していると考えられる。不安定性はノズル出口流速の増加つまりは伸長率の増加により抑えられる傾向にあるが、それはJoulin and Sivashinskyの解析[9,10]に一致する。

He希釈火炎においてHe濃度が高くなると特徴的な火炎形状を示した。図4には $\gamma = 0.79$ の場合の火炎面の直接写真を示す。火炎が凸状に丸みを帯び、火炎の縁はノズルリムに近接している。そのようなHe濃度の高い場合、一樣に消炎するのではなく火炎の中心部だけが先に消炎するような様子が見られたため、消炎伸長率の測定はHe濃度が



(a)



(b)

Fig.3 Instantaneous photographs of twin flames: (a) $p=0.1$ MPa, $U=100$ cm/s; (b) $p=0.5$ MPa, $U=30$ cm/s.

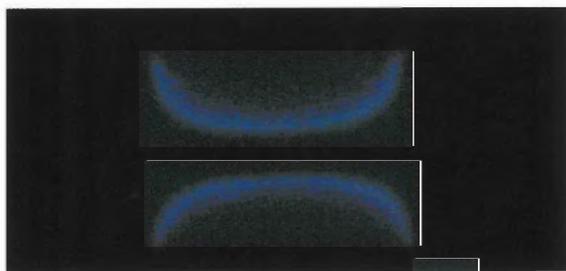


Fig.4 Instantaneous photograph of twin flames with a large volume ratio of He at 0.1 MPa, $U=150$ cm/s.

比較的低い場合に限った。

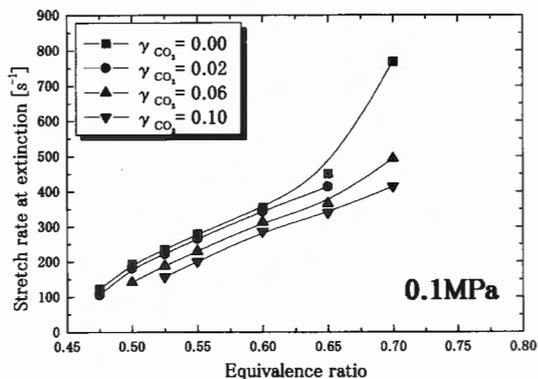
3.2. 消炎伸長率に及ぼす CO₂ および He の添加効果

雰囲気圧力および混合気組成を変えて, 消炎伸長率を測定した。伸長率の算出には以下の式を用いた。

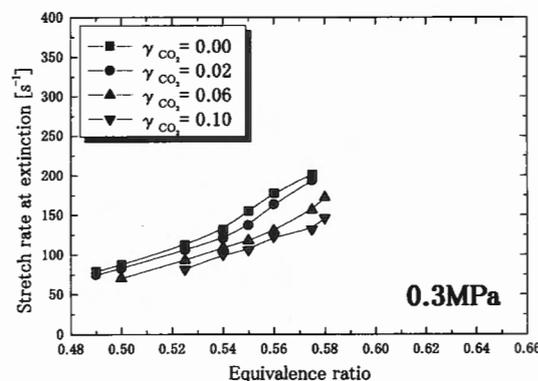
$$a=2U/d \tag{2}$$

上式で U はノズル出口流速, d はノズル間距離である。図 5 には CO₂ 添加火炎の消炎伸長率と当量比の関係について CO₂ 添加割合を変えた場合の結果を示す。但し, 本実験装置で着火が起こり, かつ流量を供給できる範囲での結果である。各実験点の右端のデータ点より高い当量比では, 本実験装置で供給できる混合気流量では消炎が起こらなかったことを意味している。

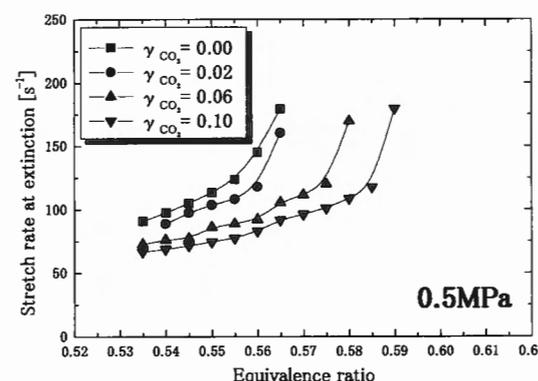
図より, 当量比, 雰囲気圧力によらず CO₂ の添加は消炎伸長率を低下させる働きを持つことがわかる。わずか 2% の添加でもその効果は顕著であり, 添加割合が増加すれば



(a)



(b)

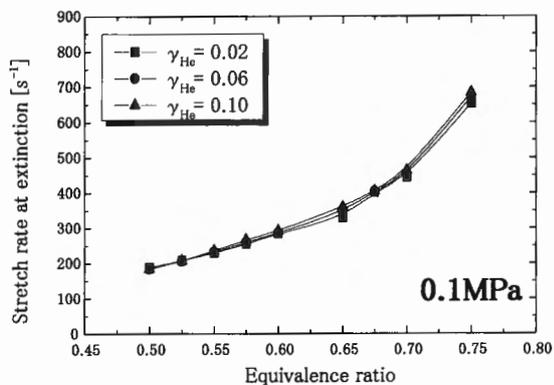


(c)

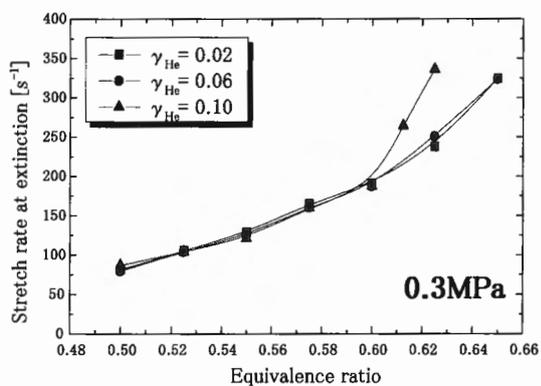
Fig.5 Effect of addition of CO₂ on stretch rate at extinction of CH₄/O₂/N₂ flame: (a) $p=0.1$ MPa; (b) $p=0.3$ MPa; (c) $p=0.5$ MPa.

するほど, 消炎伸長率も単調に減少する。前報[4]において, CO₂ 割合の高い火炎においても CO₂ 添加割合の増加に伴い, 消炎当量比が単調に減少する結果を示した。従って, 伸長消炎限界に関しては CO₂ 添加による火炎強化作用は見出せなかった。これは CO₂ 添加によるルイス数の減少や輻射再吸収効果等による火炎強化作用よりも, CO₂ 添加による燃焼速度や火炎温度の低下がより強く伸長消炎限界に影響を及ぼしたためと考えられる。

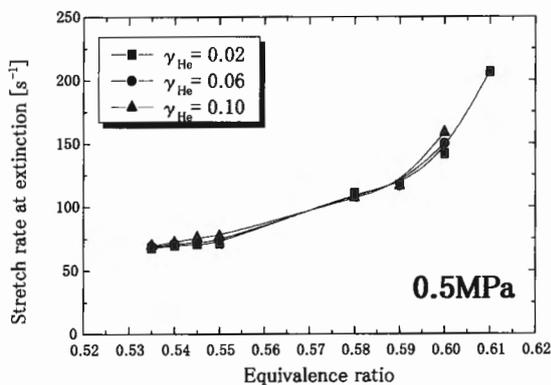
図 6 に He 添加火炎の消炎伸長率と He 添加割合の関係を示す。He 添加火炎の場合, 消炎伸長率が He 濃度にほと



(a)



(b)



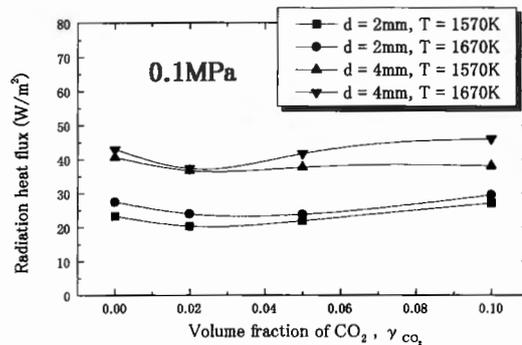
(c)

Fig.6 Effect of addition of He on stretch rate at extinction of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ flame: (a) $p=0.1$ MPa; (b) $p=0.3$ MPa; (c) $p=0.5$ MPa.

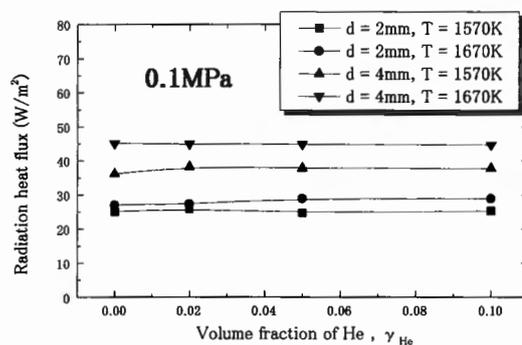
んど影響されないことがわかる。これは He 添加火炎のレイ数 Re が 1 を超えており、主に伸長効果によって消炎がもたらされるため伸長率の値に強く依存していること、および He には CO_2 のような消炎を促進する要因がないことが理由だと考えられる。

3.3. 輻射再吸収量の計測

淀み面から 115 mm 離れた主流ノズル内に取り付けた輻射センサにより、火炎からの輻射量を実測した。輻射再吸



(a)



(b)

Fig.7 Effect of addition of CO_2 or He on radiation fluxes from flames at 0.1 MPa: (a) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ flames; (b) $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{He}$ flames.

収効果を調べるために、 CO_2 添加火炎と He 添加火炎を比較するが、その際、燃焼ガス温度 (T) および 2 枚の火炎間距離 (d) を一致させて比較した。燃焼ガスの温度は R 型熱電対により測定した。それらの調整は混合気の当量比およびノズル噴出し流速を変化させることにより行った。図 7、図 8 には輻射熱流束の実測値を 0.1 MPa、0.3 MPa のそれぞれについて示す。0.3 MPa 以上の圧力下では不安定性により火炎が大きく揺らぎ、計測が困難であった。He 希釈火炎の輻射熱流束値が He の体積割合に依らず、ほぼ一定なのに対して、 CO_2 添加火炎の場合、体積割合約 0.02 付近で極小値を持つ結果となった。 CO_2 割合の増加により高温燃焼ガスからの輻射量が増大し、また未燃ガスへの吸収量も増加すると考えられる。センサへの吸収量が CO_2 割合に対して単調な変化ではなく、極小値を持つ変化となったのはそれらの複合効果であるためと考えられる。その傾向は圧力が高い程強いことが図 8 からわかる。また、圧力が高いほど輻射量も大きい。しかし、 CO_2 割合が 0 の場合からの輻射熱流束の減少量を単純に見かけの吸収量と仮定すると、雰囲気圧力 0.3 MPa の場合でさえ、その熱流束の大きさは混合気温度を 0.1 K 上昇させるにも満たない量であった。ゆえに輻射再吸収効果が顕著に現れるのは、圧力が極めて高い場合のみと考えられる。

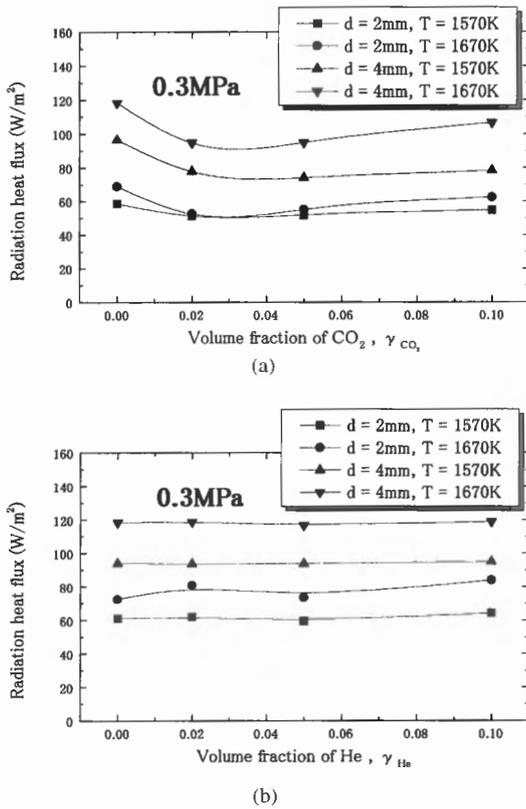


Fig.8 Effect of addition of CO₂ or He on radiation fluxes from flames at 0.3 MPa: (a) CH₄/O₂/N₂/CO₂ flames; (b) CH₄/O₂/N₂/He flames.

3.4. 伸長消炎限界に及ぼす圧力の効果

3.2 節で比較的当量比の小さい火炎に対する CO₂ 添加効果を調べ, CO₂ の添加は圧力によらず, 消炎伸長率を小さくすることがわかった. 本節ではさらに希釈剤を変えた場合の伸長消炎限界に及ぼす圧力の効果を調べる. 図 9 は大気圧下で消炎伸長率を一致させた CH₄/air 火炎, CO₂ 添加火炎, He 添加火炎の消炎伸長率が圧力とともにどのように変化するかを調べた結果である. 消炎伸長率を一致させたため, 各希釈剤により混合気の当量比は異なる. 実験装置の流量の制限から高圧, 高伸長率でのデータ点が少ないものの, 図から大気圧下の消炎伸長率の値により圧力依存性が異なることがわかる. 大気圧下で消炎伸長率が 300 [1/s] と低い火炎においては, 混合気の希釈剤の種類によらず, つまりはルイス数によらず, 消炎伸長率は圧力とともに低下する. しかし, 大気圧下の消炎伸長率の値が大きくなるにつれて, 消炎伸長率が圧力に対して変化しないか, あるいは増加に転じている. その傾向は CH₄/air 火炎, CO₂ 添加火炎, He 添加火炎の順で顕著となっており必ずしもルイス数の大きさによらない.

圧力の増加により消炎伸長率も増加する結果は, 著者らの前報[5]での数値解析結果でも得られている. 前報の数値解析では CO₂ を含まない当量比 0.7 の CH₄/air 混合気の消炎伸長率は圧力の増加によって増加したのに対して, CO₂

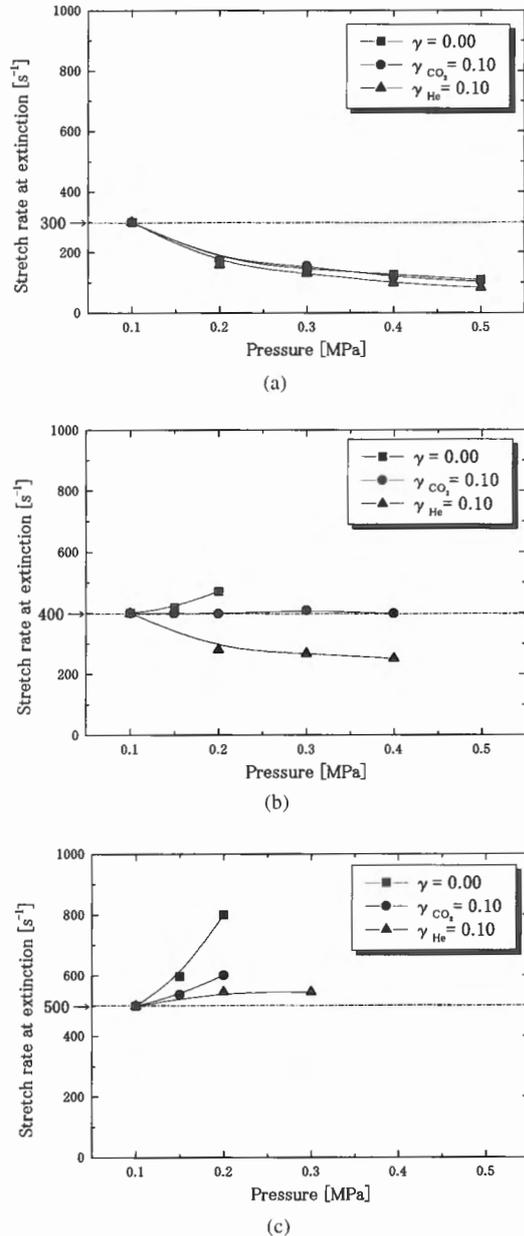


Fig.9 Effect of pressure on stretch rate at extinction: (a) $a_c=300$ [1/s] at 0.1 MPa; (b) $a_c=400$ [1/s] at 0.1 MPa; (c) $a_c=500$ [1/s] at 0.1 MPa.

を 30% 含んだ混合気の消炎伸長率は若干減少しており, 本実験結果の傾向と一致している. ルイス数が 1 以下の混合気の火炎の消炎は伸長効果と不完全燃焼の複合作用によりもたらされ, ルイス数が 1 を超える混合気の消炎は単に伸長による結果であること[11-13]がよく知られている. よって, ルイス数が 1 以下の混合気に対して, 圧力の増加による火炎帯厚さの減少は不完全燃焼を抑制すると考えられる. 一方, He 添加火炎はルイス数が 1 を超えているため, 火炎帯厚さの減少が消炎伸長率に及ぼす影響は最も小さいと考えられる. 不完全燃焼の抑制効果はルイス数の小さい CO₂ 添加火炎で最も顕著に現れるはずであるが, CO₂ 添加による消炎作用も圧力の増加で強まるため相殺してしま

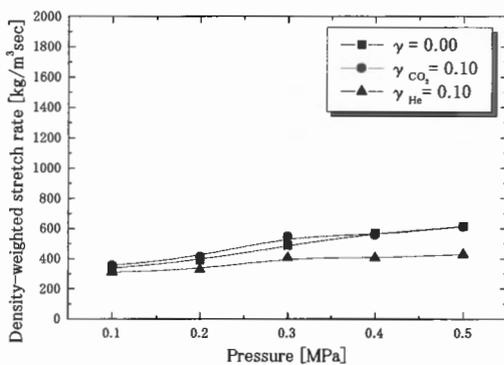


Fig.10 Effect of pressure on density-weighted stretch rate at extinction ($a_c=300$ [1/s] at 0.1 MPa).

い、 $CH_4/O_2/N_2$ 火炎より消炎伸長率の圧力依存性が小さかったと考えられる。圧力の上昇による火炎帯厚さの減少が不完全燃焼を抑制し、消炎伸長率を増大させる効果は消炎伸長率の大きい火炎つまりは当量比の大きい混合気に対する火炎ほど顕著な結果となったが、今後、数値解析等による検証も必要であろう。

Zhu et al.[7], Sun et al.[8]は雰囲気圧力の対向流予混合火炎への影響を調べる際に、密度で重みをつけた伸長率を用いている。本研究においても、図9において伸長率に密度をかけて整理しなおすと、全条件において重みつき消炎伸長率は圧力に対して単調に増加する結果となった。図10に1例として図9(a)の $a_c = 300$ [1/s]の結果に対して密度で重みをつけた消炎伸長率を示す。図9(b)および(c)に対しても同様な増加傾向を示すが、大気圧下での消炎伸長率が大きい火炎ほど、その勾配は大きくなる。しかし、その度合いは CH_4/air 火炎、 CO_2 添加火炎、 He 添加火炎の順で、図9の結果と一致した。

4. 結論

- (1) 対向流火炎の火炎面は圧力の増加とともに、Darrieus-Landau不安定性により不安定となるが、伸長の増大とともに不安定化は抑制された。
- (2) 対向流予混合火炎の消炎伸長率は CO_2 を添加すればするほど減少し、輻射再吸収効果による燃焼促進効果は0.5 MPaまでの圧力範囲では現れなかった。輻射量の直接計測実験において、輻射再吸収の効果の存在が確認されたが、その吸収量は極めて小さかった。
- (3) 雰囲気圧力の増加は火炎帯厚さを減少させる。大気圧下の消炎伸長率の大きな予混合気に対して、その効果は不完全燃焼を抑制させる働きとなり、消炎伸長率を増大させ

る傾向を示した。一方、大気圧下の消炎伸長率の小さい可燃限界付近の火炎に対しては圧力の増加は消炎伸長率の低下をもたらした。

謝辞

本研究はPrinceton Univ.のYiguang Ju博士との共同研究として開始されたものであることを記し、同博士に心より感謝致します。また、御助言頂いた東北大学 新岡嵩教授、小林秀昭助教授、実験に御協力頂いた廣田光智助手、加藤文昭、赤津喜則、山下静磨の各氏にも感謝致します。さらに、本研究は谷川熱技術振興基金及び住友財団環境研究助成金により成されたものであることを記し、謝意を表する。

References

1. Ruan, J., Kobayashi, H., Niioka, T., and Ju, Y., *Combust. Flame* 124: 225-230 (2001).
2. Tanoue, K., Kido, H., Hamatake, T., and Shimada, F., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 67: 2361-2366 (2001).
3. Ju, Y., Masuya, G., and Ronney, P.D., *Proc. Combust. Inst.* 27: 2619-2626 (1998).
4. Kido, H., Hashimoto, J., Barat, D., Nishigaki, M., and Okamoto, H., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 65: 4138-4143 (1999).
5. Takita, K., Akatsu, Y., Masuya, G., Kato, F., and Ju, Y., *Proc. Third ASPACC*, 2001, pp.425-428.
6. Kobayashi, H., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 66: 1257-1263 (2000).
7. Zhu, D. L., Egolfopoulos, F. N., and Law, C. K., *Proc. Combust. Inst.* 22: 1537-1545 (1988).
8. Sun, C. J., Sung, C. J., Zhu, D. L., and Law, C. K., *Proc. Combust. Inst.* 26: 1111-1120 (1996).
9. Sivashinsky, G. I., Law, C. K., and Joulin, G., *Combust. Sci. Technol.* 28: 155-159 (1982).
10. Joulin, G., and Sivashinsky, G. I., *Proc. Combust. Inst.* 24: 37-44 (1992).
11. Ishizuka, S., and Law, C. K., *Proc. Combust. Inst.* 19: 327-335 (1982).
12. Tsuji, H., and Yamaoka, I., *Proc. Combust. Inst.* 19: 1533-1540 (1982).
13. Sato, J., *Proc. Combust. Inst.* 19: 1541-1548 (1982).