

【研究成果の要約】

氏名	中原 真也
1. 研究題目	水素混合ガス燃焼機器の高負荷燃焼化に向けた着火安定化技術の開発研究

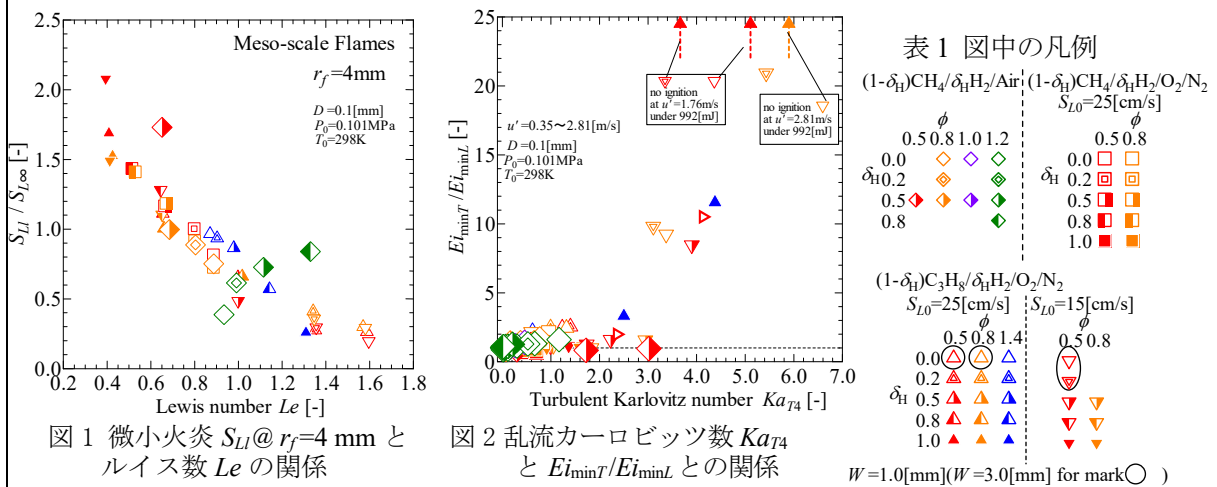
2. 研究内容

本研究では、天然ガスや eFuel の主成分のメタンを用いた水素添加混合ガスを対象に、高強度乱流場でも安定した着火技術の提案を目指し、微小火炎の燃焼速度 S_{LI} 特性および乱流場での着火特性について、当量比 ϕ 、水素添加量 δ_H や層流燃焼速度 S_{L0} の影響を検討した。

具体的には、 ϕ を 0.5、0.8、1.0 および 1.2 と広く変化させた水素-メタン-空気混合気[(1- δ_H)CH₄- δ_H H₂-Air]を主な対象とした。ここで、 δ_H は混合気の燃料に占める水素の体積割合を表す。

結果の一例として、火炎半径 r_f が 4mm 時の微小火炎の燃焼速度特性 $S_{LI}/S_{L\infty}$ とルイス数 Le との関係を図 1 に示す。なお、 $S_{L\infty}$ は火炎伸長が無い時の燃焼速度である。図 1 から、 $S_{LI}/S_{L\infty}$ とルイス数 Le とは、 ϕ や δ_H および S_{L0} や燃料の種類に因らず良い相関関係にあることがわかった。

さらに、乱流場の着火特性の支配因子の検討の一例として、提案する微小火炎の燃焼速度を基準とする乱流カーロビッツ数 Ka_{T4} と、乱流場の最小点火エネルギーを層流場の値で無次元化した Ei_{minT}/Ei_{minL} との関係を図 2 に示す。図 2 から、 ϕ や δ_H および S_{L0} や燃料の種類に因らず、 Ka_{T4} の増大にとともに、概ね Ei_{minT}/Ei_{minL} は、 Ka_{T4} が 3 程度までは穏やかに増大するが、 Ka_{T4} が 3 程度を超えると著しく大きくなり着火特性が著しく悪化する傾向にあることがわかった。



3. 研究成果

- 少なくとも当量比 0.5~1.0 の水素-メタン-空気混合気の火炎半径が 4mm 程度の微小層流球状伝ば火炎の燃焼速度特性は、当量比、水素添加量や層流燃焼速度に因らず、ルイス数やマ-クスタイン数と良い相関関係にあることを明らかにできた。
- 乱流場での着火特性へ与える水素添加の影響として、乱れ強度 u' が 0.35m/s 程度までは観察できないが、ある程度まで乱れを強くすると水素添加により最小点火エネルギーが低下し改善する傾向にあることを明らかにできた。
- 乱流場の着火特性の支配因子として、提案する微小火炎の燃焼速度を基準とする乱流カーロビッツ数に加えルイス数を考慮すると、着火の安定領域から不着火や失火へ遷移する領域をより包括的に予測できる可能性があることを明らかにできた。

【研究成果の概要】	
氏 名	中原 真也
1. 研究題目	水素混合ガス燃焼機器の高負荷燃焼化に向けた着火安定化技術の開発研究
<p>1. 研究目的</p> <p>脱炭素社会化が推進される観点から、今後さらに二酸化炭素の排出の削減がガス燃焼機器にも求められることが必須である。これに対する一つの対応策として、天然ガスやLPG、将来的には再生可能エネルギー由来の eFuel(合成燃料)に水素を混合したガスの利用、または水素や eFuel 専燃のガス燃焼機器の開発が重要となる。しかしながら、水素の混合にともなって低カロリー化することから、さらに高負荷燃焼技術が必要不可欠となる。一方、本研究者は、着火や微小な火炎核形成において分子拡散特性やルイス数が、一般的なサイズの火炎に増して重要であることを明らかにしてきた[1]。そこで、本研究では、申請者の知見を応用し水素-炭化水素混合ガスに対して、高負荷燃焼化により増大する供給ガス流量にもない高強度化する乱流下でも安定した着火技術を提案することを目的とする。具体的には、様々な乱流強度や混合ガスを対象に、着火の安定条件や制御法を明らかにする。</p> <p>2. 実験装置および方法</p> <p>本研究では、表 1 に示す、都市ガスや天然ガスの主成分であるメタンを主燃料とし、当量比ϕ(総合当量比[2])を 0.5、0.8、1.0 および 1.2 と広く変化させた水素-メタン-空気混合気$[(1-\delta_H)CH_4-\delta_H H_2-Air]$を主な対象とした。なお、一般的な火炎サイズでの層流燃焼速度 S_{L0} を 25 cm/s に揃えた水素-メタン-酸素-窒素混合気$[(1-\delta_H)CH_4-\delta_H H_2-O_2-N_2]$も対象とした。ここで、$\delta_H$ は、水素添加割合で、混合気の燃料に占める水素の体積割合を表し、水素-メタン-空気混合気では δ_H は主として 0.0~0.5($\phi=1.2$ のみ 0.8 まで)とし、S_{L0} を 10~130 cm/s 程度の広範囲で変化させた。また、燃料の差違による比較検討を行うために S_{L0} を 25 や 15 cm/s に揃えた水素-プロパン-酸素-窒素混合気$[(1-\delta_H)C_3H_8-\delta_H H_2-O_2-N_2]$ [3]も比較対象とした。表 1 中、S_{L0} は火炎半径が約 15 mm 以上の火炎伸長を概ね有しない層流火炎の燃焼速度で、圧力履歴[1]-[3]から算出した。また、Le は不足成分の拡散係数 D_d に基づくルイス数($=a_0/D_d$)、a_0 は熱拡散率、u' は乱れ強さ u'、L_f は縦方向積分尺度、η_0 は予熱帯厚さ、Da はダムケラー数、Re はレイノズル数を表す。</p> <p>実験には、図 1 に示す定容燃焼器[1][3]を使用した。内径が約 100 mm の球形に近い定容燃焼器で、向かい合う側面 4 面に直径 85 mm の観測窓、上下 2 面には直径 90 mm の多孔板を有する。多孔板後方のファンにより、充填したガスを攪拌混合および中心付近に等方性乱流場を得られる。燃焼実験は、常温常圧下、所定の乱れ強さの下で、コンデンサを用いた容量放電式によりほぼ燃焼室中央で火花点火する。</p> <p>まず、混合気の静止場で着火直後の微小火炎の実験では、本研究では、同一点火条件で微小から一般的なサイズの火炎まで撮影できないことから、火炎半径 r_f が概ね 5 mm 以下の火炎を微小火炎、7 mm 程度以上の火炎をマクロ火炎と称し、別々に撮影した。この微小火炎の実験時は、既報[1]と同様に図 1 とは異なる点火電極支持台を設置した。使用する点火電極の直径(材質:SUS)D は 0.1mm、間隙 W は、混合気により 0.5~3.0 mm と変化させた、点火エネルギー E_i は、基本は 4.8~101.6 mJ とした。</p>	

表1 主な使用した混合気および乱流条件

Mixture	ϕ	δ_H	Components [mol]							S_{L0} [cm/s]	a_0 [mm ² /s]	Le	1000rpm			
			Fuel			O ₂	Inert gas						u'/S_{L0}	L_f/η_0	Da	Re
M05-AirH05	0.5	0.5	0.5	H ₂	0.5	CH ₄	2.50	9.41	N ₂	10.7	23.74	0.65	3.29	12.6	3.8	61.1
M08-AirH00	0.8	0.0	0	H ₂	1.0	CH ₄	2.50	9.41	N ₂	27.6	21.05	0.89	1.27	36.6	28.8	63.0
M08-AirH02		0.2	0.2	H ₂	0.8	CH ₄	2.13	7.99	N ₂	28.4	22.30	0.80	1.24	35.6	28.8	62.1
M08-AirH05		0.5	0.5	H ₂	0.5	CH ₄	1.56	5.88	N ₂	43.9	25.25	0.68	0.80	48.6	60.8	59.8
M10-AirH00	1.0	0.0	0.0	H ₂	1.0	CH ₄	2.00	7.52	N ₂	38.6	21.08	/	0.91	51.1	56.2	62.9
M10-AirH05		0.5	0.5	H ₂	0.5	CH ₄	1.25	4.70	N ₂	62.7	26.19	/	0.56	66.9	119.4	59.1
M12-AirH00	1.2	0.0	0	H ₂	1.0	CH ₄	1.67	6.27	N ₂	31.1	21.11	0.93	1.13	41.2	36.5	62.8
M12-AirH02		0.2	0.2	H ₂	0.8	CH ₄	1.42	5.33	N ₂	38.6	22.89	0.99	0.91	47.1	51.7	61.4
M12-AirH05		0.5	0.5	H ₂	0.5	CH ₄	1.04	3.92	N ₂	60.8	27.08	1.11	0.58	62.8	108.5	58.3
M12-AirH08		0.8	0.8	H ₂	0.2	CH ₄	0.67	2.51	N ₂	131.4	35.62	1.33	0.27	103.2	384.4	52.6

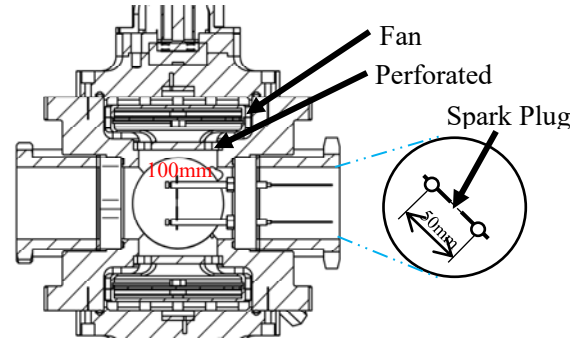


図1 定容燃焼器

微小火炎の観測には、連続シュリーレン写真撮影法を使用し、ダークポイントおよび焦点距離 800 mm のレンズを用い、高速ビデオカメラ(512×512 画素、8 bit、10,000 fps)で撮影する。なお、解像度は約 0.027 mm/pixel である。

本研究では、既報[1]と同様に、得られたシュリーレン火炎画像の火炎上端から下端までの長さ H と、上方火炎核の横方向の長径 Z から算出できる $[(Z+H)/4]$ を平均火炎半径 r_f と定義する。

次に、外向きに伝ばする球状層流火炎の平均燃焼速度 S_{Li} を連続の式から次式のように定義した [1]

$$S_{Li} = (\rho_b / \rho_u) \cdot dr_f / dt \quad (1)$$

ここで、 ρ_b および ρ_u は既燃ガスおよび未燃混合気の密度、 dt は画像取り込み時間間隔である。

さらに、層流場および乱流場での着火特性の検討では、図1に示す、向かい合う側面4面の内1つは点火電極と一体になっている定容燃焼器を使用した。ここでは、ファン回転数を 1000、5000 および 8000 rpm とし、乱れ強さ u' は 0.35、1.76 と 2.81 m/s を対象とした。表1に、ファン回転数が 1000rpm 時の乱れ特性値を一例として示す。なお、比較のため、 $u'=0$ m/s の層流場での燃焼実験も実施した。また、観測窓に取り付けた点火電極は、乱れ場の妨げにならないように図1に示すように 45° 傾けて設置している。さらに、点火電極(材質:SUS)は、着火特性に与える影響を極力小さくするために、電極直径 D を 0.1 mm とし、電極間隙 W は基本的には 1.0 mm とし、場合によっては 3.0mm も用いた。

燃焼実験は、常温常圧下で、分圧法により上記の混合気を燃焼器に充填し、所定の乱れ強さの下で、コンデンサを用いた容量放電式によりほぼ燃焼室中央で火花点火する。本研究では、コンデンサ容量

を調整することで点火エネルギーを 0.8 mJ から 992.2 mJ まで変化させることができる。

そして、各混合気の層流場での最小点火エネルギー $E_{i_{minL}}$ および乱流場での $E_{i_{minT}}$ を各乱れ強さの下で決定した。なお、最小点火エネルギー $E_{i_{min}}$ とは火花放電により火炎核が形成され火炎伝ばに至る確率が 50%となる点火エネルギーと定義した[1]-[3]。

3. 実験結果および考察

3.1 微小火炎の燃焼速度特性

図 2 に、一例として $\phi=0.8$ の水素-メタン-空気混合気に対して得られた火炎半径 r_f と得られた燃焼速度 S_{LI} を $S_{L\infty}$ で無次元化した値の関係を示す。なお、 $S_{L\infty}$ は既報[1][3]と同様にマクロ火炎を対象に算出した火炎伸長が 0 の S_{LI} の値であり、本研究では S_{L0} に概ね相当する。また、図 2 のグレーのシンボルは、点火エネルギーを受けた領域として以下の議論では除く[1][3]。

図 2 から、火炎半径 r_f が 5 mm 以下の微小火炎の燃焼速度特性は、水素添加量に依存し、同一火炎半径では、燃焼速度 $S_{LI}/S_{L\infty}$ は増加する傾向にあり、 $\delta_H=0.5$ では、その燃焼速度は火炎サイズの影響を受けなくなることがわかる。

次に、微小な火炎サイズにおける燃焼速度特性を支配する因子について検討する。ここでは、まず、一例として示した図 2 において、 $r_f=4$ mm における燃焼速度を代表値として抽出した $S_{LI}/S_{L\infty}$ と δ_H との関係を図 3 に示す。さらに、 $r_f=4$ mm における燃焼速度を代表値として抽出した $S_{LI}/S_{L\infty}$ とレイス数 Le およびマークスタイン数 Ma との関係を図 4 に示す。ここで、 Le は熱と物質の拡散のバランスを表し火炎面形状の安定または不安定程度を示す指針で、 $Le < 1.0$ ほど火炎面形状が不安定化し易い。 Ma は層流火炎の火炎伸長に対する火炎の燃焼速度に与える感度を表す指針で、 $Ma < 0$ ほど燃焼特性が増大する傾向にある。なお、図 4 には、 S_{L0} を揃えた水素-メタン-酸素-窒素混合気および水素-プロパン-酸素-窒素混合気の結果[3]も合わせて示す。

図 3 より、層流燃焼速度が当量比や水素添加量により変化する水素-メタン-空気混合気では、本実験範囲では、微小な火炎サイズでは、水素添加により燃焼速度特性が改善することが明らかである。

さらに図 4 より、 $\phi=1.2$ の $\delta_H=0.5$ 以上を除けば、当量比や水素添加量のみならず層流燃焼速度

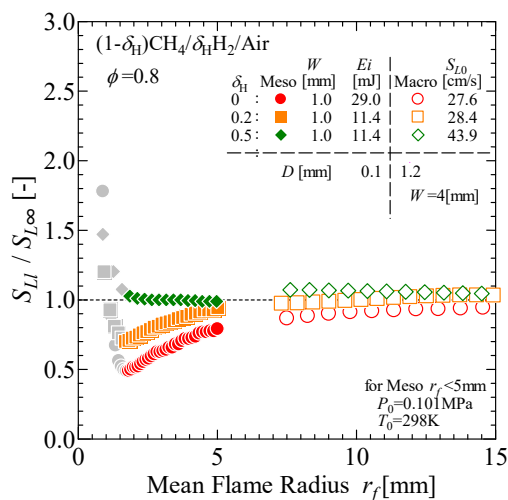


図 2 火炎半径 r_f と燃焼速度 S_{LI} の関係 ($\phi=0.8$ 水素-メタン混合気)

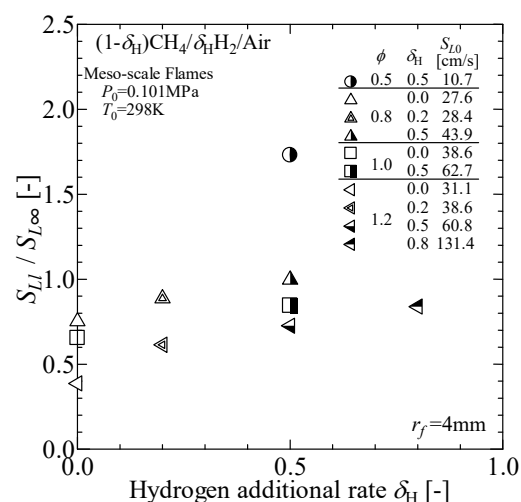


図 3 燃焼速度特性@ $r_f=4$ mm と水素添加 δ_H の関係

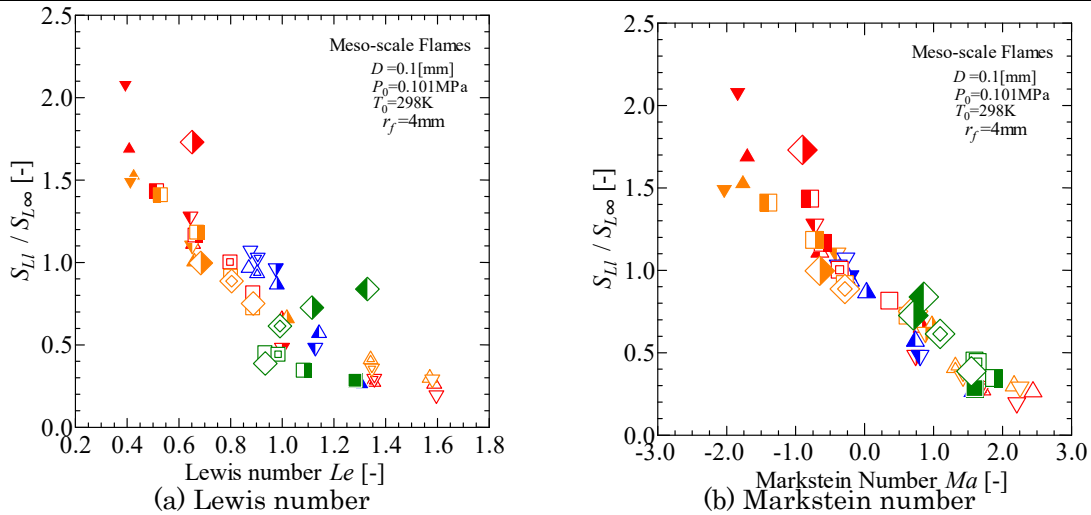
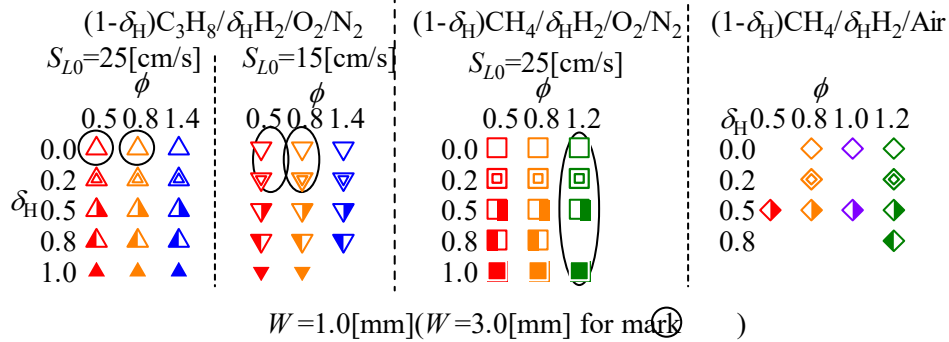


図4 燃焼速度特性@ $r_f=4\text{ mm}$ とルイス数 Le およびマークスタイン数 Ma との関係



や燃料の差違によらず、 $S_{Li}/S_{L\infty}$ は Le および Ma とともに大きくなると小さくなる傾向にあり良い相関関係にあることがわかる。

したがって、微小な火炎サイズの燃焼速度特性は、ルイス数やマークスタイン数に着目することで、整理できることが明らかである。

3.2 乱流場での着火特性

次に、乱流場での着火特性を検討するために、表1の混合気に対して得られた、乱流場での Ei_{\min} を層流場での Ei_{\min} で無次元化した $Ei_{\min T}/Ei_{\min L}$ と δ_H との関係を図5に示す。

図5より、本実験範囲では、まず、 $\phi=0.5$ を除き、 $Ei_{\min T}/Ei_{\min L}$ は、 u' の増加により大きくなり着火特性が悪化する傾向にあることがわかる。さらに、 $Ei_{\min T}/Ei_{\min L}$ は、 $u'=0.35\text{m/s}$ 程度では、 δ_H を増加しても大きな変化は無いが、 $u'=1.7\text{m/s}$ 程度以上になると δ_H を増加にともない低下する傾向にあることがわかる。すなわち、水素添加量の影響は、乱れ強さが增大するほど大きいことが明らかである。これは、着火による火炎核形成に際し、すぐれた分子拡散特性を有する水素が、乱れの増加により見かけ上の大きくなった火炎核の曲率が影響していると推測できる。

最後に、乱流場での着火特性を支配する因子について検討した。まず、微小火炎の燃焼速度特性では良い相関関係があった Le と $Ei_{\min T}/Ei_{\min L}$ との関係を図6に示す。

図6から、 Le と $Ei_{\min T}/Ei_{\min L}$ の間には図4の様な明確な相関関係はみられないことが明らかである。なお、 Ma と $Ei_{\min T}/Ei_{\min L}$ の間でも図6と同様な傾向があることが観測されており、 Le や Ma では乱流場の着火特性を包括的に整理できないことがわかる。

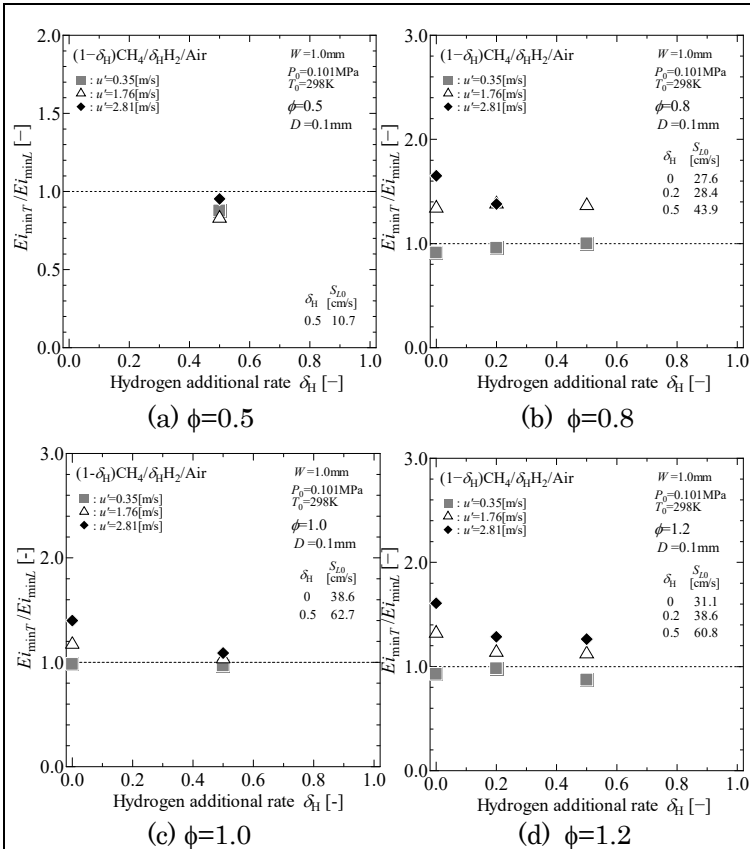


図5 乱流場の最小点火エネルギー $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ と水素添加量 δ_H との関係

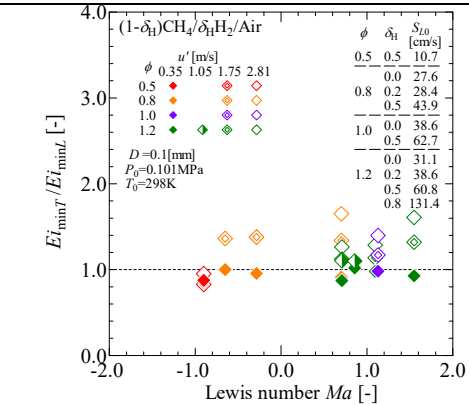


図6 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ とレイリス数との関係

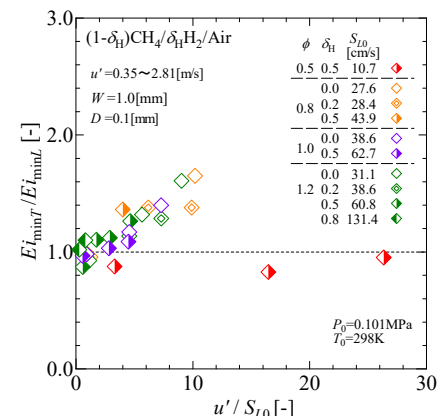


図7 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ と相対乱れ強さ u'/S_{L0} との関係

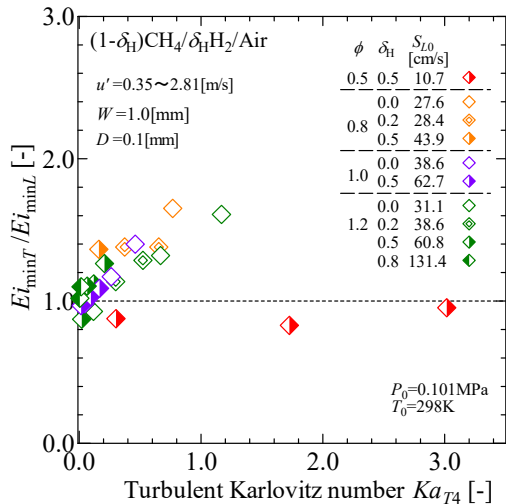


図8 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ と乱流カーロビッツ数 Ka_{T4} との関係

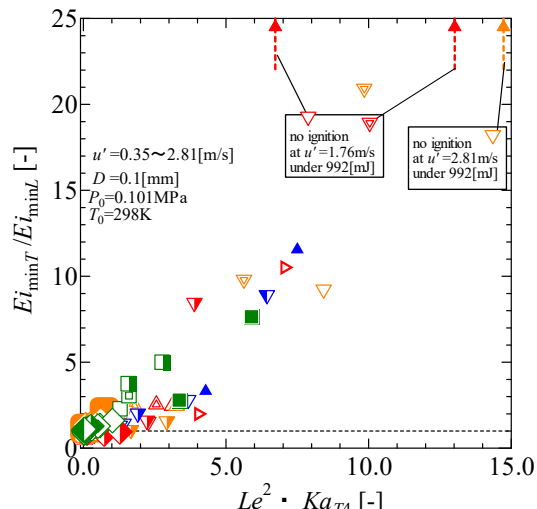


図9 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ と $Ka_{T4} \times Le^2$ との関係

次に、相対乱れ強度である u'/S_{L0} と $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ との関係を図7に示す。図7より、 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ は、 u'/S_{L0} が増大すると、増加する傾向にあり図6に比べ相関関係があることがわかる。しかし、 $\phi=0.5$ が u'/S_{L0} が増大してもないほとんど変化せず、 u'/S_{L0} のみでは着火特性が包括的には整理できないことが明らかである。

ここで、既報[3]で提案した $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ と微小火炎の燃焼速度を基準とした乱流カーロビッツ数 Ka_{T4} との関係を図8に示す。なお、 Ka_{T4} は次式で定義した。

$$Ka_{T4} = u' \lambda_g \cdot \eta_0 / S_{Li} \quad (2)$$

ここで、 λ_g はTaylor微細尺度を表し、 S_{Li} は図4の $r_f=4$ mmにおける燃焼速度である。

既報[3]では、この提案する乱流カーロピッツ数 Ka_{T4} を用いると、 Ka_{T4} の増大にともない、 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ は、 Ka_{T4} が 3 程度までは穏やかに増大するが、 Ka_{T4} が 3 程度を超えると著しく大きくなり着火特性が著しく悪化することを明らかにした。すなわち、 Ka_{T4} を用いることにより、乱流場の着火特性の遷移領域が 3 程度と予測でき、乱流場の着火特性が整理できる可能性があることを示した。

図 8 から、 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ は Ka_{T4} に対して、上述の傾向は若干観察されるものの、 $\phi=0.5$ に関して Ka_{T4} が 3 程度で遷移領域をもつ上述の傾向は観察されず、図 7 の u'/S_{L0} と同様で、残念ながら包括的に整理できないことがわかる。

そこで、これまでの我々の知見である、火炎面が湾曲する乱流燃焼場では分子拡散特性が大きく影響することを応用し、乱流場の着火特性の整理に、分子拡散特性の影響が含まれるレイス数 Le を考慮することとした。図 9 に、 Ka_{T4} に Le^2 を考慮した $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ との関係を示す。なお、図 9 には、 S_{L0} を揃えた水素-メタン-酸素-窒素混合気および水素-プロパン-酸素-窒素混合気の結果[3] も合わせて示す。

図 9 から、 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ は、 $Ka_{T4} \times Le^2$ が 4 程度までは穏やかに増大するが、 $Ka_{T4} \times Le^2$ が 4 程度を超えると著しく大きくなり着火特性が著しく悪化する傾向にあることがわかる。

すなわち、 $E_{i_{min}T}/E_{i_{min}L}$ に関して、本実験条件である当量比、水素添加量、層流燃焼速度および炭化水素燃料の種類に因らず、着火の安定領域から、不着火や失火への遷移領域を決定する因子として $Ka_{T4} \times Le^2$ が重要であることを明らかにできた。

4. 本研究の成果

燃料には主に CO_2 の排出量が少ない天然ガスや eFuel の eメタンの主成分のメタンを用いた水素添加混合ガスを対象に、高強度乱流場でも安定した着火技術の提案を目指し、火炎半径が 5 mm 以下の微小なサイズの火炎の燃焼速度特性、および等方性乱流場を用いた着火特性について水素添加量、当量比や層流燃焼速度の影響を検討した。なお、比較のために水素-プロパン混合気についても検討した。

- (1) 少なくとも当量比 0.5~1.0 の水素-メタン-空気混合気の火炎半径が 4mm 程度の微小層流球状伝ば火炎の燃焼速度特性は、当量比、水素添加量や層流燃焼速度および炭化水素燃料の種類に因らず、レイス数やマークスタイン数と良い相関関係にあることを明らかにできた。
- (2) 乱流場での着火特性へ与える水素添加の影響として、乱れ強度 u' が 0.35m/s 程度までは観察できないが、1.7m/s 程度まで乱れを強くすると水素添加により最小点火エネルギーが低下し改善する傾向にあることを明らかにできた。
- (3) 乱流場の着火特性の支配因子として、提案する微小火炎の燃焼速度を基準とする乱流カーロピッツ数に加えレイス数を考慮すると、着火の安定領域から不着火や失火へ遷移する領域をより包括的に予測できる可能性があることを明らかにできた。

謝辞

本研究は、一般財団法人パロマ環境技術開発財団により研究助成金により実施できたものであり、ここに深く謝意を表す。

参考文献

1. Nakahara, M., Abe, F., Tokunaga, K., and Ishihara, A. Fundamental burning velocities of meso-scale propagating spherical flames with H₂, CH₄ and C₃H₈ mixtures. *Proc. Combustion Inst.* Vol.34, pp.703-710, (2013).
2. 中原真也, 橋本淳, 白砂貴盛, 月川正善, 水素添加プロパン予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的検討, 日本機械学会論文集B編, Vol.75, No.760, pp. 2550-2557, (2009) .
3. Masaya NAKAHARA, Kodai TANIMOTO, Hisanobu KUDO, Yuta MARUYAMA and Fumiaki ABE, Effects of Hydrogen addition and Turbulence on Ignition and Meso-scale Flames of Propane Mixtures, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.17, No.3, pp.1-10, (2022).