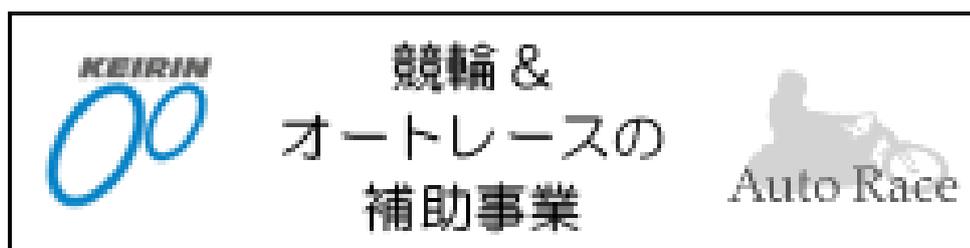


平成29年度JKA補助事業
「分子選択的拡散特性の活用による
水素爆発防止技術に関する研究」
報 告 書
(2年間事業)

2019年(令和元年)5月1日

愛媛大学 工学部
機械工学科 熱工学研究室
中原 真也



目 次

1. はじめに	・・・ 1
2. 実施内容及び成果	・・・ 3
(1) 実施内容	・・・ 3
① 定容燃焼器を用いた基礎燃焼特性の検討に関する研究	
② 2次元燃焼器を用いた水素火炎伝ば特性の検討に関する研究	
③ 水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術の検討に関する研究	
(2) 成 果	・・・ 6
① 定容燃焼器を用いた基礎燃焼特性の検討に関する研究	
② 2次元燃焼器を用いた水素火炎伝ば特性の検討に関する研究	
③ 水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術の検討に関する研究	
3. 業界等において今後予想される効果	・・・ 17

謝辞

問い合わせ先

1. はじめに

水素は、二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーとして燃料電池に用いられる他、直接燃焼も検討されている。また石油精製や化学合成等からも取り出すことができるため、産業にとって安定的なエネルギーや資源の供給体制が構築される。さらに、水素は電池に代わるエネルギーキャリアとしても注目されている。この水素利用社会へ向けた取り組みが産官学で進められている。

一方で、2011年の東日本大震災で福島第一原子力発電所において発生した水素爆発は、大きな社会問題を生じ、水素爆発の恐ろしさが広く認識された。この様に水素爆発の影響の大きさから、古くは水素-空気に希釈ガスを添加した混合気の静止場での爆発限界が米国鉱山局等により詳細に調査されてきた。しかしながら、実際の水素漏洩場では、ガス流動等の影響により火炎面には凹凸が生じ乱流火炎面化していることが容易に想像でき、これらの静止場でのデータが実際の事故で有用か不透明である。また従来の炭化水素燃料に比べて、火炎伝ば速度が速い水素では、従来型の初期消火設備であるスプリンクラーによる水噴霧が有効でない可能性も指摘されている。

従って、安全・安心な水素利用社会の構築には、水素の製造・貯蔵輸送・利用の各段階に潜在化する水素火災等事故に対応した、新たな水素爆発防止技術の開発が必要不可欠である。

一方、申請者はこれまでの研究で火炎面が凹凸を有する場ではルイス数効果および分子拡散特性に起因した選択拡散効果が重要であること初めて明らかにしてきた。

そこで、本研究では、この水素火災・爆発事故さらには甚大な被害をもたらす爆ごうへの遷移の防止技術を開発するために、従来型の水噴霧等ではなく、申請者のこれまでの成果を基に次の2点に着目した新しい概念の消火・爆発防止技術を構築することを目的とする。

① ルイス数効果にも着目した、分子拡散特性が大きく異なる2種類の希釈ガスまたは炭化水素燃料の利用による消炎

② 消炎に最適な火炎の凹凸スケールに制御する格子の利用

すなわち、本研究では、熱と物質の移動のバランスを表すルイス数効果に着目し、例えば分子拡散特性が大きく異なるヘリウムと二酸化炭素が、火炎面に凹凸がある場合に、その未燃混合気側に凸および凹な各火炎部分に選択的に拡散する効果を能動的に活用し、両火炎部分の燃焼反応を効率よく低下・停止させ、水素伝ば火炎全体を消炎に至らしめる新しい消火・爆発防止技術の開発を目標とする。

具体的には、本研究はJKA補助事業の支援を受け次の3項目について実施した。

① 定容燃焼器を用いた基礎燃焼特性の検討に関する研究

まず本研究で対象とした水素-炭化水素-2成分希釈ガス混合気および水素 - プロパン混合気の基礎燃焼・消炎特性を把握するために、定容燃焼器を用いて最小着火エネルギーや火炎核形成特性、乱流燃焼速度や消炎限界特性を把握・評価した。

② 2次元燃焼器を用いた水素火炎伝ば特性の検討に関する研究

水素設備のロッカー等を模擬した格子により任意スケールの火炎凹凸形状を発生できる2次元燃焼器を製作し、2つの希釈ガス(或いは燃料)の混合比および濃度が火炎伝ば・消炎特性に与える影響の把握・評価した。

③ 水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術の検討に関する研究

二成分希釈ガスや炭化水素の混合が水素伝ば火炎に、格子を用いて曲率を与え各希釈ガスの分子拡散特性またはレイス数効果を能動的に作用させ、その効果が火炎伝ば加速の抑制や消炎へ与える影響について検討した。

2. 実施内容及び成果

(1) 実施内容

本研究補助事業は、これまでに研究者が得た凹凸を有する火炎面で支配因子となるルイス数効果および分子拡散特性を活用した新しい消炎法である「分子選択的拡散特性の活用による水素爆発防止技術」を構築することが目的である。1年目は、分子拡散特性が大きく異なる二酸化炭素(CO₂)とヘリウム(He)の2成分の希釈ガスに着目し、2年目は、分子拡散特性が水素とは大きく異なる炭化水素の影響および既存の水素自動車とガソリン車等との事故などに着目し、本技術の構築を目指し研究を進めた。

① 定容燃焼器を用いた基礎燃焼特性の検討に関する研究

まず1年目は、当量比 ϕ が0.7、1.0、1.4の水素 - 空気混合気をCO₂とHeで希釈し、層流燃焼速度 S_{L0} を35、50そして70 cm/sに揃えた水素 - 空気 - 2成分希釈ガス[H₂-AIR-CO₂-He]混合気を対象とした。ここで、二成分希釈時には、CO₂とHeの添加割合の変化は δ_{CO_2} を用いて表し、 $\delta_{CO_2}=0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0$ と変化させた。ただし、 S_{L0} が35 cm/sの場合、 $\phi=1.0$ の $\delta_{CO_2}=0.0, 0.2$ および $\phi=1.4$ の $\delta_{CO_2}=0.0, 0.2, 0.5, 0.8$ では、さらに S_{L0} が50 cm/sの場合、 $\phi=1.0$ の $\delta_{CO_2}=0.0$ および $\phi=1.4$ の $\delta_{CO_2}=0.0$ と0.2では、火炎伝ばする混合気を作ることができなかったため、計36種類の混合気を使用した。表1に、一例として S_{L0} が35 cm/sの混合気を示す。

表1中、 Le は不足成分の拡散係数 D_d に基づくルイス数 $Le (= a_0/D_d)$ を表す。ここで、 a_0 は熱拡散係数である。なお、 δ_{CO_2} は、CO₂単成分希釈時の各 ϕ におけるCO₂のモル数を基準としたモル割合を表す。すなわち、 $\delta_{CO_2}=0.0$ はHe単成分、 $\delta_{CO_2}=1.0$ はCO₂単成分希釈を表す。そして、 S_{L0} を揃えるために、例えば、 δ_{CO_2} を大きくした場合、Heの希釈量を減少させて調整した。

まず図1の定容燃焼器を用いて、表1に示すような層流燃焼速度 S_{L0} を揃えた当量比 ϕ および二酸化炭素とヘリウムの添加割合の異なる水素 - 空気 - 2成分希釈ガス[H₂-AIR-CO₂-He]混合気を探索し組成を決定した。

次に、対象とした混合気の基礎燃焼特性として、引き続き図1(a)の定容燃焼器を用いて最小着火エネルギー $E_{i,min}$ 、そして図1(b)を用いて乱流燃焼速度 S_T 特性を調査した。

Table 1 H₂-AIR-CO₂-He 混合気の一例

Mixture	ϕ	δ_{CO_2}	Components [mol]					S_{L0} cm/s	Le
			H ₂	O ₂	N ₂	He	CO ₂		
h070-35-He-CO ₂ 00	0.7	0.0	1.00	0.71	2.69	5.26	-	34.7	0.82
h070-35-He-CO ₂ 02		0.2	1.00	0.71	2.69	3.80	0.39	35.1	0.72
h070-35-He-CO ₂ 05		0.5	1.00	0.71	2.69	2.17	0.98	34.8	0.59
h070-35-He-CO ₂ 08		0.8	1.00	0.71	2.69	0.85	1.56	35.1	0.47
h070-35-He-CO ₂ 10		1.0	1.00	0.71	2.69	-	1.95	35.1	0.39
h100-35-He-CO ₂ 05	1.0	0.5	1.00	0.50	1.88	3.10	0.90	35.2	-
h100-35-He-CO ₂ 08		0.8	1.00	0.50	1.88	1.12	1.44	35.0	-
h100-35-He-CO ₂ 10		1.0	1.00	0.50	1.88	-	1.80	35.1	-
h140-35-He-CO ₂ 10	1.4	1.0	1.00	0.36	1.34	-	1.53	35.3	1.31

Table 2 $(1-\delta_p)H_2-\delta_p C_3H_8-Air-N_2/O_2$ 混合気

Mixture	ϕ	δ_p	Components[mol]				S_{L0} [cm/s]	Le	a_0 [mm ² /s]	T_P [K]
			C ₃ H ₈	H ₂	O ₂	N ₂				
H05-25NP00	0.5	0.0	0.00	1.00	1.00	6.63	24.7	0.41	29.5	1221
H05-25NP02		0.2	0.20	0.80	2.80	8.54	25.2	0.65	24.7	1716
H05-25NP05		0.5	0.50	0.50	5.50	14.19	25.4	1.00	21.4	1824
H05-25NP08		0.8	0.80	0.20	8.20	20.09	25.2	1.35	20.1	1857
H05-25NP10		1.0	1.00	0.00	10.00	24.40	24.6	1.59	19.6	1857
H08-25NP00	0.8	0.0	0.00	1.00	0.63	6.00	24.8	0.43	30.7	1338
H08-25NP02		0.2	0.20	0.80	1.75	8.81	24.9	0.66	24.9	1804
H08-25NP05		0.5	0.50	0.50	3.44	15.02	24.9	1.00	21.4	1911
H08-25NP08		0.8	0.80	0.20	5.13	21.04	25.0	1.34	20.0	1962
H08-25NP10		1.0	1.00	0.00	6.25	24.94	24.9	1.57	19.5	1985
H10-25NP00	1.0	0.0	0.00	1.00	0.50	5.56	24.7	-	31.5	1417
H10-25NP02		0.2	0.20	0.80	1.40	8.26	24.8	-	25.2	1905
H10-25NP05		0.5	0.50	0.50	2.75	13.67	25.2	-	21.5	2041
H10-25NP08		0.8	0.80	0.20	4.10	19.19	25.2	-	19.9	2087
H10-25NP10		1.0	1.00	0.00	5.00	22.55	25.1	-	19.3	2117
H12-25NP00	1.2	0.0	0.00	1.00	0.42	5.08	24.9	1.28	32.5	1319
H12-25NP02		0.2	0.20	0.80	1.17	7.06	25.3	1.10	25.9	1791
H12-25NP05		0.5	0.50	0.50	2.29	11.46	25.2	0.97	21.6	1935
H12-25NP08		0.8	0.80	0.20	3.42	16.06	25.2	0.91	19.7	1983
H12-25NP10		1.0	1.00	0.00	4.17	18.42	25.3	0.88	19.0	2039
H14-25NP00	1.4	0.0	0.00	1.00	0.36	4.67	25.0	1.31	33.5	1246
H14-25NP02		0.2	0.20	0.80	1.00	5.12	24.9	1.14	27.3	1846
H14-25NP05		0.5	0.50	0.50	1.96	8.19	25.0	0.98	21.8	1979
H14-25NP08		0.8	0.80	0.20	2.93	11.22	25.1	0.90	19.4	2038
H14-25NP10		1.0	1.00	0.00	3.57	12.68	25.3	0.87	18.3	2101

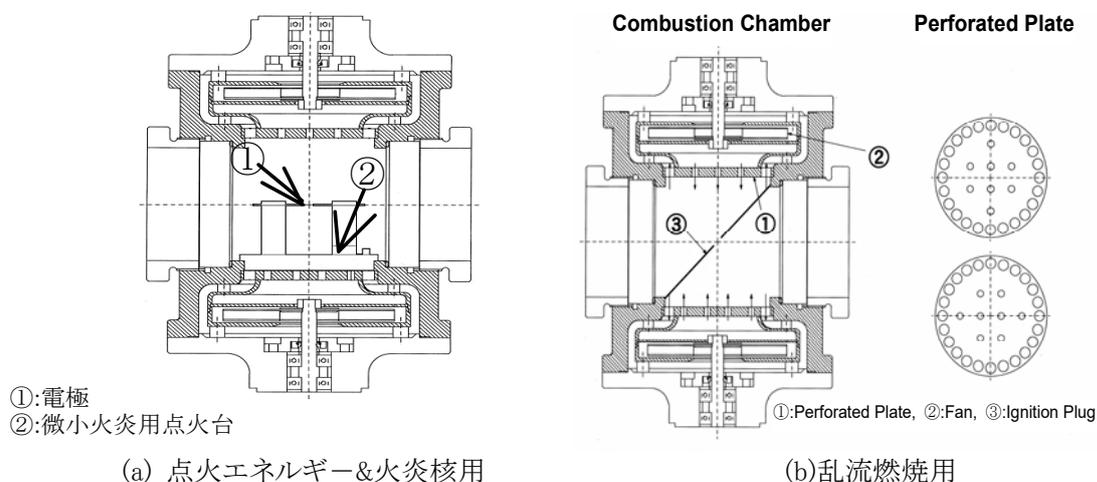


Fig.1 定容燃焼器の概要

2年目は、既存のガソリンスタンドと水素ステーションの併設や既存のガソリンやディーゼル自動車と水素自動車との事故にも対応できるように、さらには燃料の分子拡散特性を応用した火炎伝ば抑制技術を構築するために、炭化水素燃料にも着目した。具体的には、初年度と同様に、炭化水素として代表的で水素とは大きく拡散特性が異なるプロパンの分子選択的拡散特性が、炎伝ば加速の抑制や消炎へ与える影響を明らかにし、水素爆発防止技術の構築を目指した。

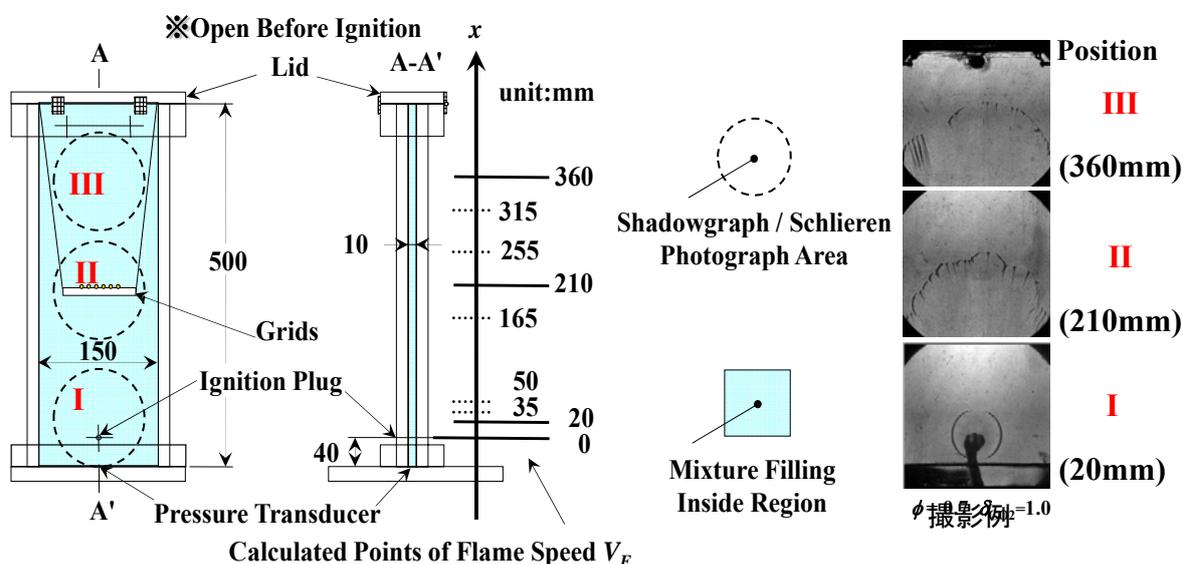
そこで、プロパンC₃H₈を用い、当量比 ϕ が0.5~1.4で、窒素N₂または酸素O₂を添加することに

より層流燃焼速度 S_{L0} を25 cm/sに揃えた水素 - プロパン $[(1-\delta_P)H_2-\delta_P C_3H_8-Air-N_2/O_2]$ 混合気を対象とした。ここで、 δ_P は燃料全体の体積に対するプロパンの体積割合、 ϕ は二種類の燃料中の各炭素および水素分子数を基にした総合当量を表す。なお、 $\delta_H H_2-(1-\delta_H)C_3H_8$ 混合気と表現する場合は、 δ_H は燃料全体の体積に対する水素の体積割合を表し、 $\delta_P=(1-\delta_H)$ の関係がある。表2中、 T_{pl} は化学平衡計算による定圧断熱燃焼温度である。

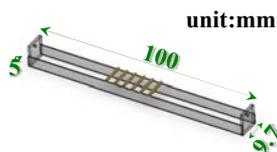
$(1-\delta_P)H_2-\delta_P C_3H_8-Air-N_2/O_2$ 混合気に対しても、 $H_2-Air-CO_2-He$ 混合気と同様に基礎燃焼特性の検討を実施した。

② 2次元燃焼器を用いた水素火炎伝ば特性の検討に関する研究

実際の水素爆発や爆ごう現象は、空間における伝ば火炎の加速が重要な因子である。そこで、本研究では、これまでに知見がほとんど無い燃焼器に機材やロッカー等の調度類の隙間を模擬した空間、いわゆる狭隘空間を模擬した2次元燃焼器を使用し、火炎伝ば状況を詳細に観測した。使用した実験装置の概略を図2に示す。ここで、本2次元燃焼器のサイズは、断面が 10×150 mm、底面から上端までの高さが500 mmで、火炎伝ば状況を可視化して観測するためにアクリル製とした。実験は、燃焼器内を真空に引いた後、予め制作した混合気を大気圧まで充填し、上端部の蓋を開放し2秒後に、常温常圧の下、燃焼器底部から40 mmの位置にて火花点火により着火した。火炎伝ばの観測は、高速度ビデオカメラを組み合わせた連続シャドウグラフ法およびシュ



(a) 2次元燃焼器 (格子設置の場合)



(b) 格子の一例

Fig.2 狭隘空間を模擬した2次元燃焼器

リーレン法により行った。得られた画像から、モデル縦方向中心での火炎面位置 x_F および火炎伝ば速度 V_F の算出を行った。

なお、多種多様な混合気を使用しているが、燃焼器内の組成はガスクロマトグラフで確認している。

③ 水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術の検討に関する研究

ここでは、二成分希釈ガスや炭化水素の混合が水素伝ば火炎に、すなわち H_2 -AIR- CO_2 -He混合気や $(1-\delta_P)H_2-\delta_P C_3H_8$ -Air- N_2/O_2 混合気を対象に、曲率を与え各希釈ガスの分子拡散特性またはルイス数効果を能動的に作用させ、その効果が火炎伝ば加速の抑制や消炎へ与える影響について検討した。

そこで、火炎に曲率を与えるために、図2に示すように2次元実験器内に図2(b)の格子を設けた。なお、使用する格子は、断面が 9.6×100 mm、高さが5 mmの亚克力製の枠の上に、直径1 mm、長さ9.7 mmの真鍮製の丸棒6本を2 mmと等間隔に並べている。なお、図2に示すように格子の設置位置は、点火栓から上方向に210 mmの位置とした。なお、格子の間隔を4mmや形状についても検討対象とした。また、火炎の性状および消炎を判断するために静電探針による計測も行った。

さらに、得られた結果を基に、分子選択的拡散特性を考慮するためにルイス数を用いて整理しモデル化の検討も行った。

(2) 成 果

① 定容燃焼器を用いた基礎燃焼特性の検討に関する研究

表1の H_2 -AIR- CO_2 -He混合気の基礎燃焼特性として、図1の定容燃焼器を用いて最小着火エネルギー $E_{i_{min}}$ を調査した一例として、 S_{L0} が35 cm/sで $\phi=0.7$ の結果を図3に示す。

図3からわかるように、 δ_{CO_2} の増加すなわちヘリウムに対して相対的に二酸化炭素を増加させると、 $E_{i_{min}}$ が低下することを明らかにできた。なお、本傾向は、他の当量比や層流燃焼速度でも同様に観測された。

さらに、基礎燃焼特性として乱流燃焼速度特性を検討した。一例として S_{L0} が35 cm/sの $\phi=0.7$ の結果を図4に示す。

図4からわかるように、 δ_{CO_2} の増加すなわち相対的に二酸化炭素を増加させると、同一乱れ強さ u' の乱流燃焼速度 S_T は増大することを明らかにできた。なお、本傾向は、他の当量比や層流燃焼速度でも同様に観測された。

以上より、 δ_{CO_2} の減少すなわち相対的に分子拡散速度が大きなヘリウムを増加させると、最小着火エネルギーや乱流燃焼速度の基礎燃焼特性から、燃焼を抑制する方向へ働くことを明らかにできた。

次に表2の水素 - プロパン $[(1-\delta_P)H_2-\delta_P C_3H_8$ -Air- $N_2/O_2]$ 混合気を対象とした基礎燃焼特性

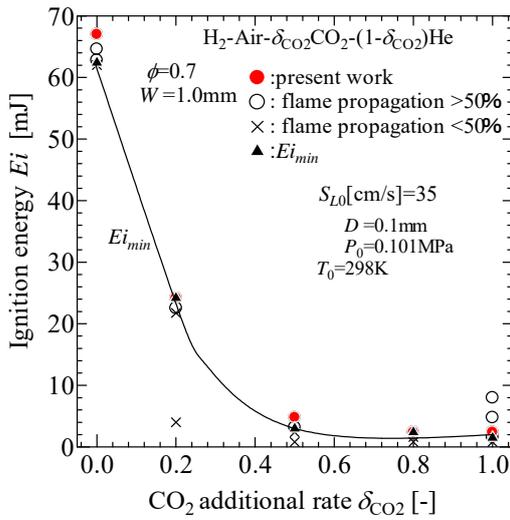


Fig.3 点火エネルギー E_i と CO_2 添加割合 δ_{CO_2} との関係
[H_2 -AIR- CO_2 -He, $\phi=0.7$, $S_{L0}=35\text{cm/s}$]

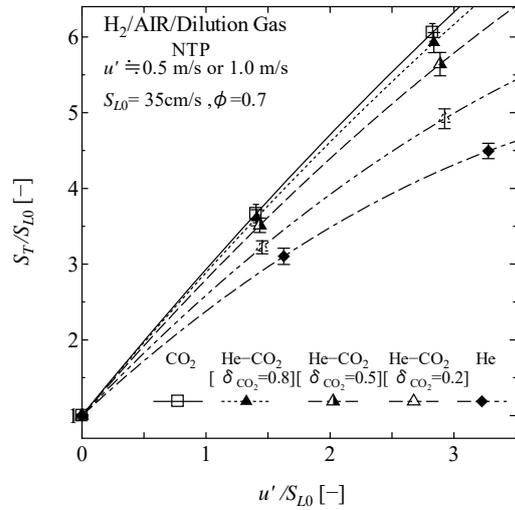


Fig.4 S_{L0} で無次元化した乱流燃焼速度 S_T と乱れ強さ u' との関係
[$\phi=0.7$, $S_{L0}=35\text{cm/s}$]

として、最小着火エネルギー $E_{i_{min}}$ を調査した一例として、 $\phi=0.5$ と 1.4 の結果を図5に示す。
図5からわかるように、 $\phi=0.5$ では δ_H が小さく、すなわちプロパンの添加量 δ_P が増えると最小着火エネルギーが大きくなり、着火しづらくなることがわかる。しかしながら、過濃混合気の $\phi=1.4$ では、逆に δ_H が大きく、すなわちプロパンの添加量 δ_P が少ないほど $E_{i_{min}}$ が大きく着火しづらくなる傾向にある。層流燃焼速度を揃えた混合気ではあるが、希薄と過濃混合気で、着火に与える水素混合気へのプロパンの添加の影響が大きく異なることを明らかにできた。

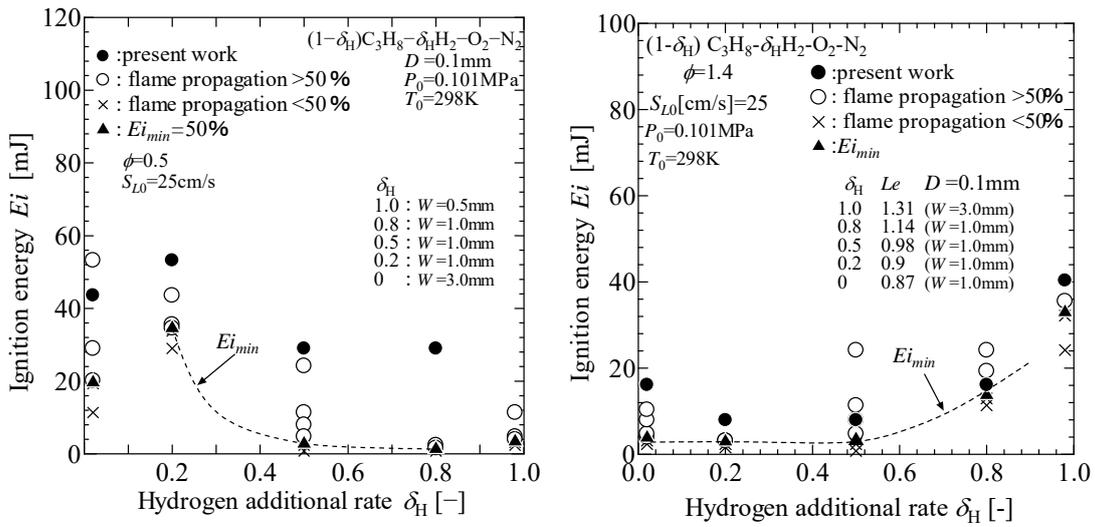
さらに、基礎燃焼特性として乱流燃焼速度特性を検討した一例として、 $\phi=0.5$ と 1.4 の結果を図6に示す。

図6から、同一乱れ強さ u' での乱流燃焼速度 S_T は、 $\phi=0.5$ の場合、 δ_H が小さく、すなわちプロパンの添加量 δ_P が増えると増大し、乱流燃焼速度特性が改善することがわかる。しかしながら、過濃混合気の $\phi=1.4$ の場合、同一 u' での S_T は、逆に δ_H が大きく、すなわちプロパンの添加量 δ_P が少ないほど低下する傾向を示すことがわかる。希薄と過濃混合気で、着火のみならず乱流燃焼速度特性にも水素混合気へのプロパンの添加の影響が大きく異なることを明らかにできた。

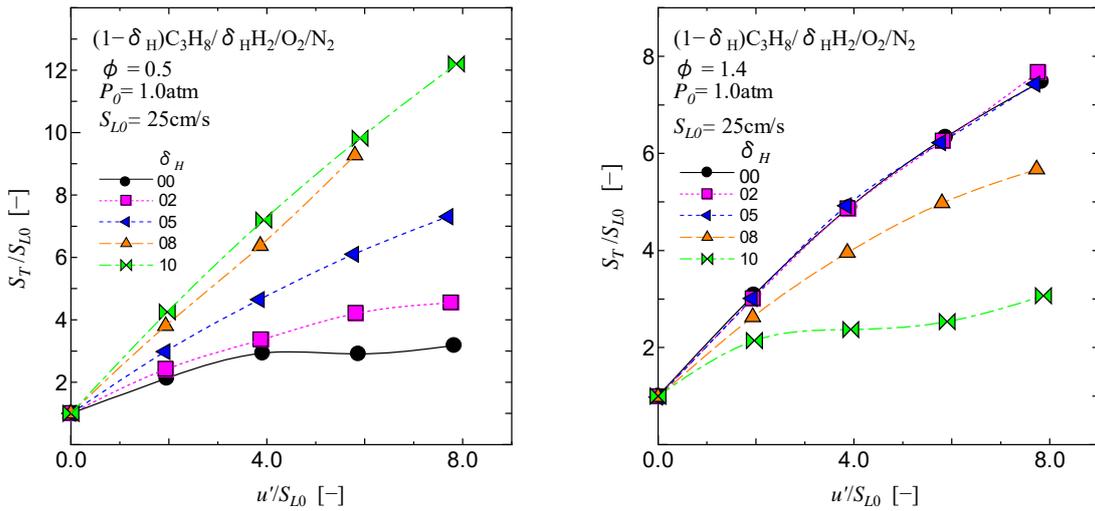
以上より、希薄混合気では分子拡散速度が小さなプロパン添加量を増加させると、最小着火エネルギーや乱流燃焼速度の基礎燃焼特性から、燃焼を抑制する方向へ働くことを明らかにできた。

② 2次元燃焼器を用いた水素火炎伝ば特性の検討に関する研究

まず表1の H_2 -AIR- CO_2 -He混合気に対して得られた結果の一例として、 $S_{L0}=35\text{cm/s}$ に揃えた混合気における無次元火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係を図7に示す。ここで、 V_{F0} は火炎が側壁や底部に達していない位置 $x_F=20\text{mm}$ での火炎伝ば速度、 H は点火線から燃



(a) $\Phi=0.5$ (b) $\Phi=1.4$
 Fig.5 点火エネルギー E_i と水素添加割合 δ_H との関係
 $[\delta_H \text{ H}_2 - (1 - \delta_H) \text{ C}_3\text{H}_8 - \text{Air} - \text{N}_2 / \text{O}_2 \quad \Phi = 0.5 \& 1.4, S_{L0} = 25 \text{ cm/s}]$



(a) $\Phi=0.5$ (b) $\Phi=1.4$
 Fig.6 S_{L0} で無次元化した乱流燃焼速度 S_T と乱れ強さ u' との関係
 $[\delta_H \text{ H}_2 - (1 - \delta_H) \text{ C}_3\text{H}_8 - \text{Air} - \text{N}_2 / \text{O}_2 \quad \Phi = 0.5 \& 1.4, S_{L0} = 25 \text{ cm/s}]$

焼器開放端までの距離460 mmである。

図7に示すように、当量比 ϕ に因らず、概ね x_F/H の増大、すなわち火炎伝ばにともない火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} は増大する傾向にあることが明らかになった。したがって、狭隘空間では水素火炎は伝ばの進行にともない加速することがわかる。なお、燃焼器開放端付近で火炎伝ば速度が減少する傾向にあるが、これは開放端における外部空気との希薄の影響と考えられる。さらに、同一当量比では、 δ_{CO_2} の増加すなわち相対的に二酸化炭素を増加させると、同一伝ば距離での火炎伝ば速度は増大することがわかる。この火炎伝ば加速特性は、図3で述べた乱流燃焼速度

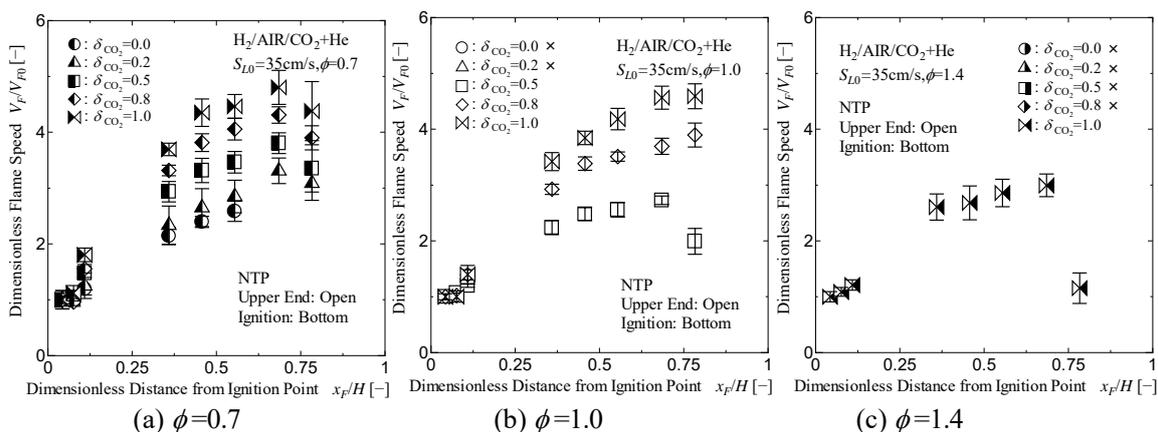


Fig.7 無次元火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係
[H₂-AIR-CO₂-He, $\phi=0.7, 1.0$ & 1.4 , $S_{L0}=35\text{cm/s}$]

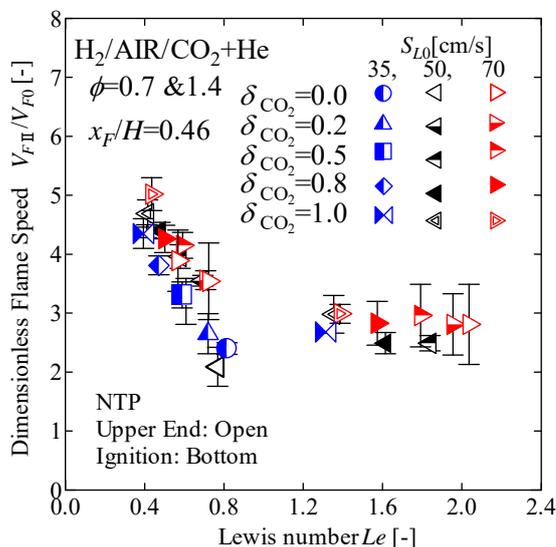
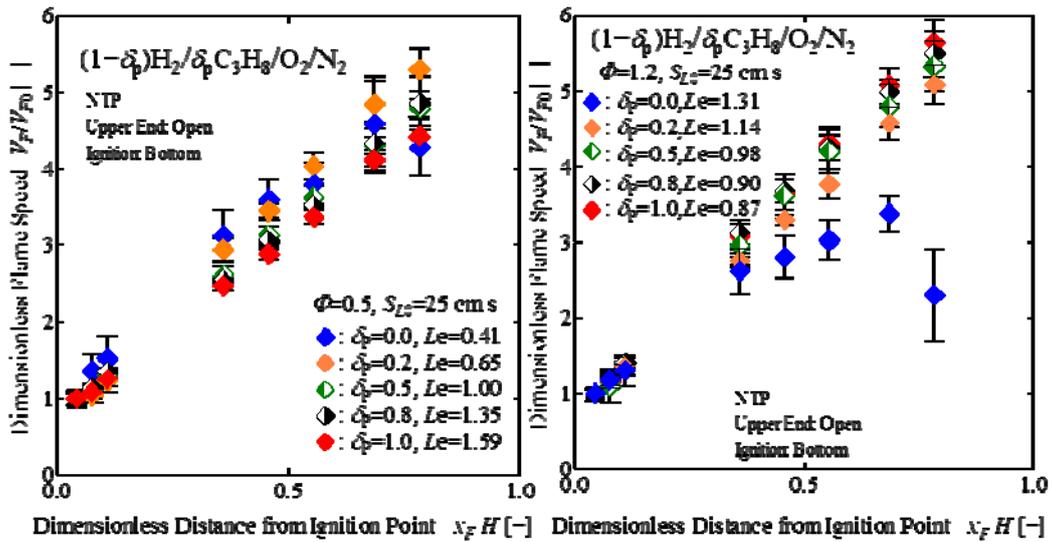


Fig.8 火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} 特性値とルイス数 Le との関係
[H₂-AIR-CO₂-He, $\phi=0.7$ & 1.4 , $S_{L0}=35, 50$ & 70cm/s]

特性と比較すると、両者は強い相関関係にあることが明らかである。なお、本傾向は、他の当量比や層流燃焼速度でも同様に観測された。

次に、火炎伝ば特性に与えるルイス数の影響について検討した。図7の $x_F/H=0.46$ ($x_F=210$ mm)における V_F/V_{F0} の値を代表値 V_{FII}/V_{F0} として抽出し、ルイス数 Le に対して整理を試みた。結果を図8に示す。図8には、 $S_{L0}=50$ と 70 cm/sに揃えた混合気の結果も合わせて示す。なお、 Le とは、熱拡散率と不足成分の物質の拡散係数の比を表す無次元数であり、火炎面の不安定性などの燃焼特性に影響を与えることで知られている。

図8に示すように、当量比や層流燃焼速度さらには δ_{CO_2} 値すなわちヘリウムや二酸化炭素の添加割合によらず、 Le の増加にともない、火炎伝ば速度 V_{FII}/V_{F0} は減少する傾向にあることがわかる。さらに、 Le が1程度以上に大きくなると V_{FII}/V_{F0} の減少率が著しく小さくなることがわかる。すなわち、ルイス数の増大させるためにHeの希釈量を増大させると、火炎伝ばの加速の増



(a) $\Phi = 0.5$ (b) $\Phi = 1.4$
 Fig.9 無次元火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係
 $[(1-\delta_p)H_2-\delta_p C_3H_8-Air-N_2/O_2 \Phi = 0.5 \& 1.4, S_{L0}=25\text{cm/s}]$

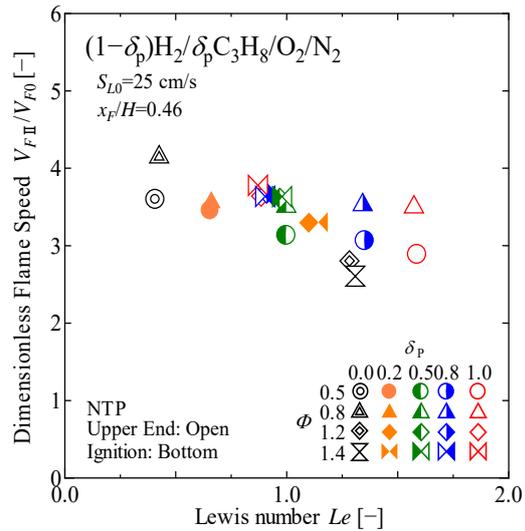
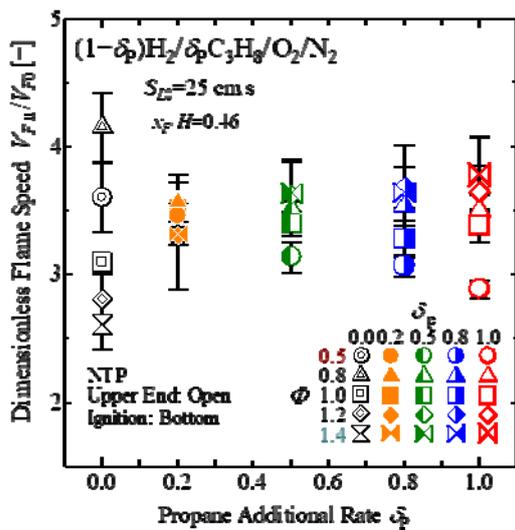


Fig.10 無次元火炎伝ば速度の代表値 V_{FII}/V_{F0} と当量比 ϕ およびプロパン添加量 δ_p との関係
 $[(1-\delta_p)H_2-\delta_p C_3H_8-Air-N_2/O_2 \Phi = 0.5 \sim 1.4, S_{L0}=25\text{cm/s}]$

Fig.11 無次元火炎伝ば速度 V_{FII}/V_{F0} とルイス数 Le との関係
 $[(1-\delta_p)H_2-\delta_p C_3H_8-Air-N_2/O_2 \Phi = 0.5 \sim 1.4, S_{L0}=25\text{cm/s}]$

大を抑制できる可能性があることが明らかとなった。

さらに、以上の結果より、ルイス数を用いることによって、水素火炎の伝ば加速特性を整理できる可能性があることを明らかにできた。

次に、 $(1-\delta_p)H_2-\delta_p C_3H_8-Air-N_2/O_2$ 混合気を対象に得られた結果の一例として、 $\Phi = 0.5$ と1.4の混合気に対する無次元火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係を図9に示す。

図9に示すように、当量比 ϕ やプロパンの添加量 δ_p に因らず、概ね x_F/H の増大、すなわち火

炎伝ばにともない火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} は増大する傾向にあることが明らかになった。したがって、狭隘空間では燃料が炭化水素火炎でも伝ばの進行にともない加速することがわかる。なお、燃焼器開放端付近で火炎伝ば速度が減少する傾向にあるが、これは開放端における外部空気との希薄の影響と考えられる。

さらに、まず希薄混合気の場合($\phi=0.5$)は、 δ_P の増加すなわち相対的にプロパンを増加させると、同一伝ば距離での火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} は減少することがわかる。一方、過濃混合気の場合($\phi=1.4$)は、 δ_P を増加させると、希薄とは逆に、無次元火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} は増加する傾向にあることがわかる。

他の当量比についても δ_P の影響を明らかにするために、図9の $x_F/H=0.46(x_F=210\text{ mm})$ における V_F/V_{F0} の値を代表値 V_{FII}/V_{F0} として抽出し、 δ_P に対して整理した結果を図10に示す。

図10から、 $\phi=0.5$ と 0.8 では δ_P の増加にともない、 V_{FII}/V_{F0} は減少する傾向を示し、 $\phi=1.2$ と 1.4 では δ_P の増加にともない V_{FII}/V_{F0} は増加する傾向を示すことがわかる。一方、 $\phi=1.0$ では、 δ_P にともなう伝ば速度の変化は概ねみられない。なお、同一 $\delta_P=0.5$ と 0.8 において ϕ の減少にともない V_{FII}/V_{F0} は減少する傾向にあることもわかる。

以上のように、希薄と過濃混合気で、プロパン添加の影響が、火炎伝ばにともなう加速機構に大きな差異があることを明らかにできた。また、この火炎伝ば加速特性は、図6で述べた乱流燃焼速度特性と比較すると、両者は強い相関関係にあることが明らかである。

図8と同様にルイス数の影響について検討するために図10をルイス数 Le に対して整理したものを図11に示す。図11から、 ϕ や δ_P の差異に因らず、 Le の増加にともない、 V_{FII}/V_{F0} は減少する傾向を示す。また、 $\phi=0.5$ と 0.8 では δ_P の増大にともない Le は増加し、 $\phi=1.2$ と 1.4 では逆の傾向を示すことも明らかにできた。

以上のように、希釈ガスや燃料の差異に因らず、水素火炎伝ばの加速や抑制をルイス数で整理できることが明らかにした。

③ 水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術の検討に関する研究

まず表1の H_2 -AIR- CO_2 -He混合気に対して得られた結果の一例として、シュリーレン法により撮影した、 $\delta_{CO_2}=0.5$ で、 $\phi=0.7$ および $\phi=1.0$ の $S_{L0}=35\text{ cm/s}$ に揃えた混合気における格子通過後の火炎画像を図12(a)と(b)に示す。図12より、 $\phi=0.7$ の場合、格子通過後の火炎面は乱れながら伝ばするが、 $\phi=1.0$ の場合、格子通過後の火炎面は火炎伝ば速度が急激に減少し、消炎している可能性があることが観察できた。なお、静電探針によるイオン電流波形からも同様の計測が得られている。

次に、一例として $S_{L0}=35\text{ cm/s}$ に揃えた混合気で、同一 $\phi=0.7$ で δ_{CO_2} を変化させた混合気、さらに同一 $\delta_{CO_2}=0.5$ で当量比を変化させた混合気における格子通過前後の無次元火炎伝ば速度 V_{FG}/V_{FGII} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係を図13に示す。ここで、 V_{FGII} は火炎が格子に接触する直前の位置 $x_F/H=0.44$ での火炎伝ば速度である。なお、図13中の一点鎖線は格子の位置を示す。図13(a)に示すように、同一 ϕ の下では、 δ_{CO_2} の減少にともない格子通過後の火炎伝ば速度 V_{FG}/V_{FGII} は、減少する傾向にあることがわかった。また、図13(b)から、同一 δ_{CO_2} では、



(a) $\phi=0.7, \delta_{CO_2}=0.5$



(b) $\phi=1.0, \delta_{CO_2}=0.5$ 【消炎】

Fig.12 格子を通過する水素火炎の様子
[Grids Distance=2 mm, H₂-AIR-CO₂-He, S_{L0}=35 cm/s, $\delta_{CO_2}=0.5$]

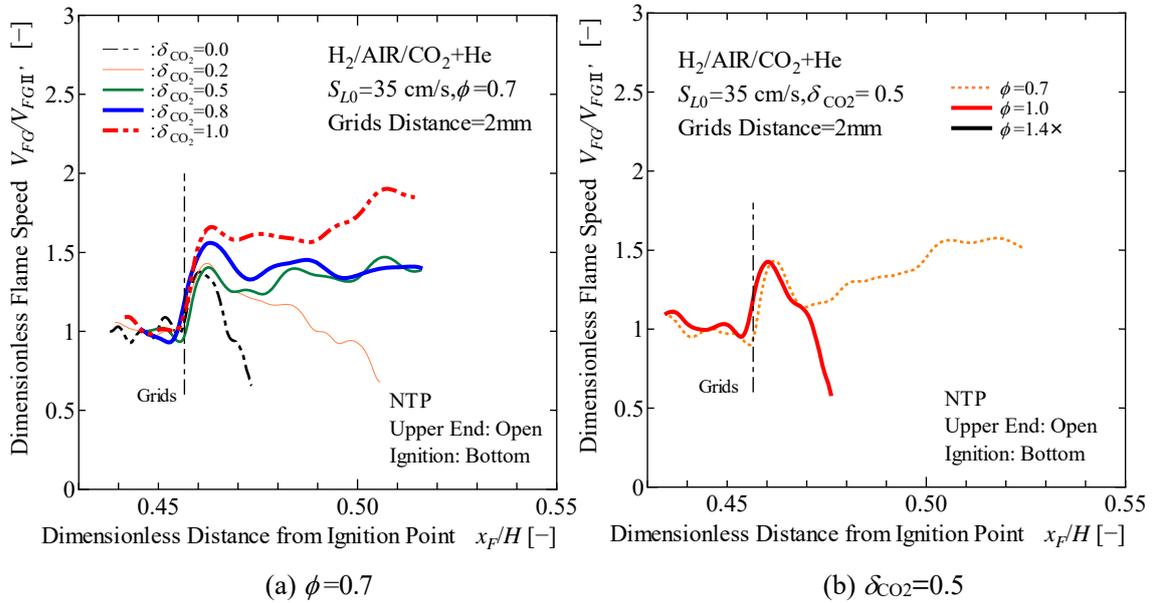


Fig.13 格子を通過する無次元火炎伝ば速度 V_{FG}/V_{FGII} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係
[Grids Distance=2 mm, H₂-AIR-CO₂-He, S_{L0}=35 cm/s]

ϕ の増加すなわち燃料濃度の増加にともない火炎伝ば速度 V_{FG}/V_{FGII} は減少する傾向にあり、 $\phi=1.0$ で $\delta_{CO_2}=0.5$ の混合気においては格子通過後の V_{FG}/V_{FGII} が顕著に減少し、その後、消炎している可能性があることがわかった。このような現象は、 $\phi=0.7$ で $\delta_{CO_2}=0.0$ と $\delta_{CO_2}=0.2$ の混合気においても観察された。これは、格子を用いたことによる Le 効果や分子拡散効果の増大、および火炎の伸長効果が要因であると考えられる。

次に、図12や13で得られた格子による火炎伝ば加速の抑制や消炎効果を、各層流燃焼速度(S_{L0}=35, 50 & 70 cm/s)について整理したマップを図14に示す。図14中、格子通過後の火炎伝ばが、◎は加速した場合、○は概ね等速になった場合、×は消炎になった場合を示す。

図14から、層流燃焼速度の差異によらず、基本的には当量比が大きな過濃な混合気ほど、

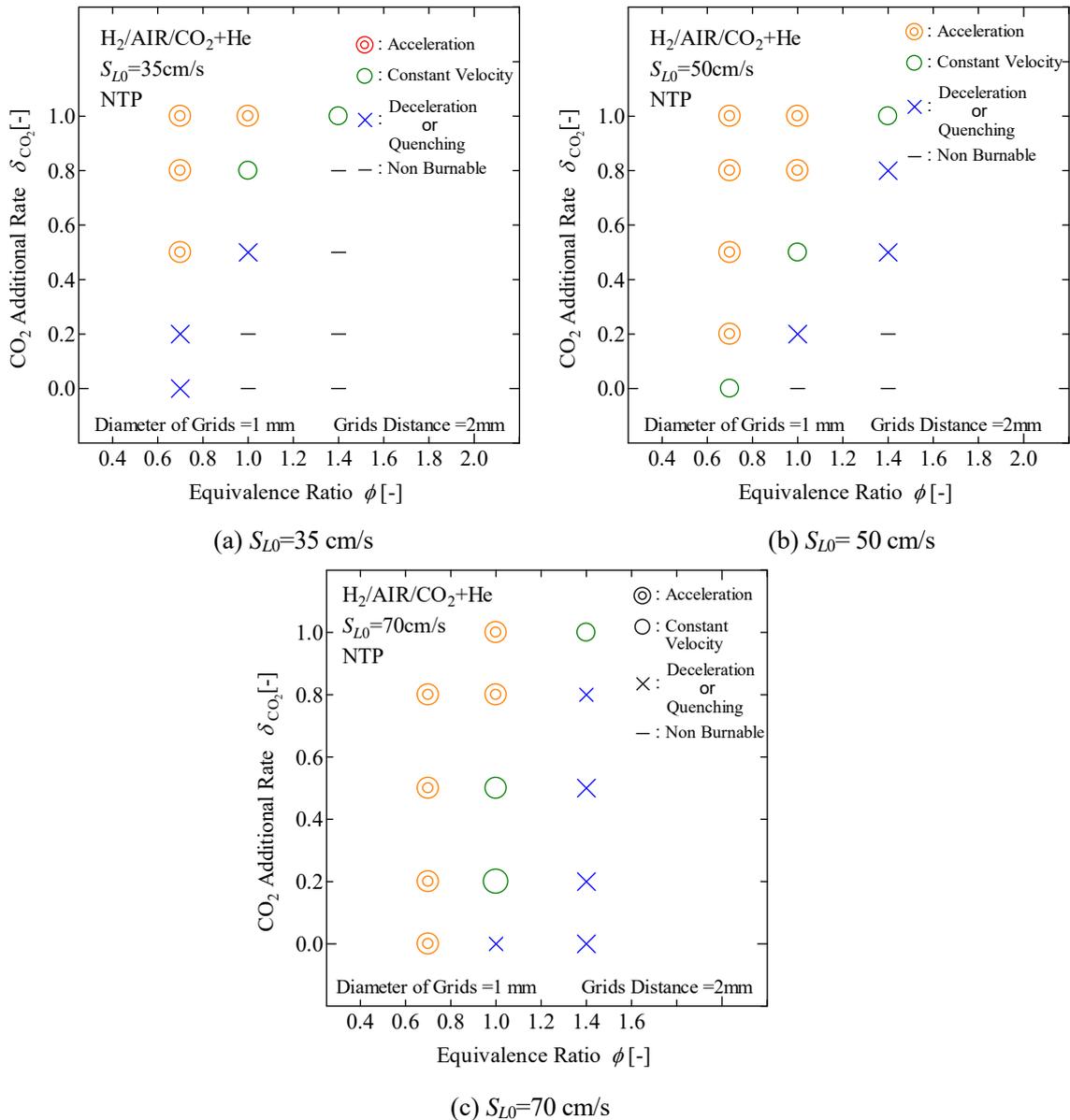


Fig.14 格子を通過する水素火炎の火炎伝ば加速・抑制特性のマップ
[Grids Distance=2 mm, H₂-AIR-CO₂-He]

ヘリウム添加量の効果が大きく現れ、火炎伝ば加速の抑制さらには消炎に至らしめ易くなることが明らかにできた。

今後、本マップを俯瞰することにより、他の当量比や層流燃焼速度などの各種混合気に対しても、格子により火炎伝ば加速を抑制する混合気条件を提示する手法を構築できる可能性がある。

次に、図8で明らかにした水素火炎の火炎伝ば加速特性におけるルイス数の重要性を、格子を用いた火炎消炎機構にも適応できるか試みた。

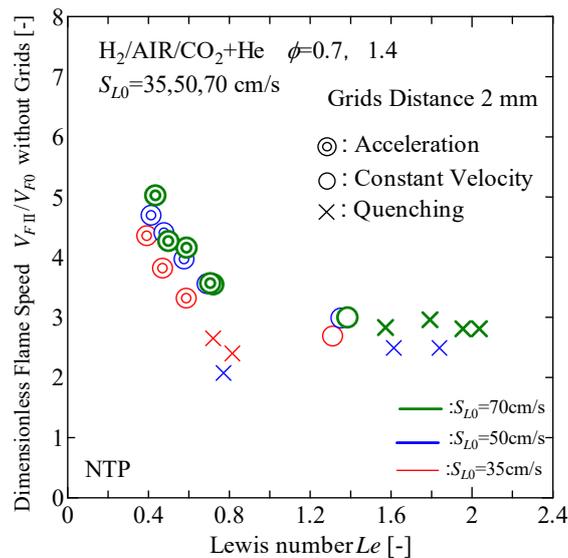


Fig.15 格子を通過する水素火炎の火炎伝ば加速・抑制特性とルイス数との関係
[Grids Distance=2 mm, H_2 -AIR- CO_2 -He, S_{L0} =35, 50 & 70cm/s]

図15に、図8の2次元燃焼器で得られた水素火炎伝ば特性に、図14で得られた格子による火炎伝ば抑制の結果を合わせて示す。

図15から、若干今後の検討が必要な条件は存在するが、広い層流燃焼速度および当量比並びにヘリウムと二酸化炭素の添加割合に対して、ルイス数を大きくすること、特にルイス数を1付近より大きくすることにより、水素火炎でもその火炎伝ばの加速抑制さらには消炎に至らしめることが明らかにできた。

次に、 $(1-\delta_p)H_2-\delta_p C_3H_8-Air-N_2/O_2$ 混合気を対象に、同様に格子の影響について検討した。

図16に一例として、シャドウグラフ法により撮影した、 $\phi=0.8$ で $\delta_p=0.2$ および $\delta_p=0.8$ の混合気における格子通過後の火炎画像を示す。図16より、 $\delta_p=0.2$ では格子通過後の火炎面が乱れて伝ばするが、 $\delta_p=0.8$ では格子通過後の火炎面は乱れているが伝ば速度が低下し火炎が消失している様子が観察できる。

次に、図17に一例として $\phi=0.8$ で δ_p を変化させた混合気、さらに $\delta_p=0.2$ で ϕ を変化させた混合気における格子通過前後の無次元火炎伝ば速度 V_{FG}/V_{FGII} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係を示す。図17(a)より希薄混合気では δ_p の増加にともない格子通過後の V_{FG}/V_{FGII} は、減少する傾向にあることがわかる。一方、図17(b)から、同一 δ_p では ϕ の増加に伴い V_{FG}/V_{FGII} は減少する傾向にあることがわかる。さらに、 $\phi=1.4$ で $\delta_p=0.2$ の混合気において、格子通過後の V_{FG}/V_{FGII} が顕著に減少し、その後、消炎している可能性があることが分かる。このような現象は、 $\phi=0.8$ で $\delta_p=0.8$ と $\delta_p=1.0$ の混合気においても観察された。これは、図15と同様に、格子を用いたことによる Le 効果や分子拡散効果の促進、および火炎の伸長効果が要因であると考えられる。

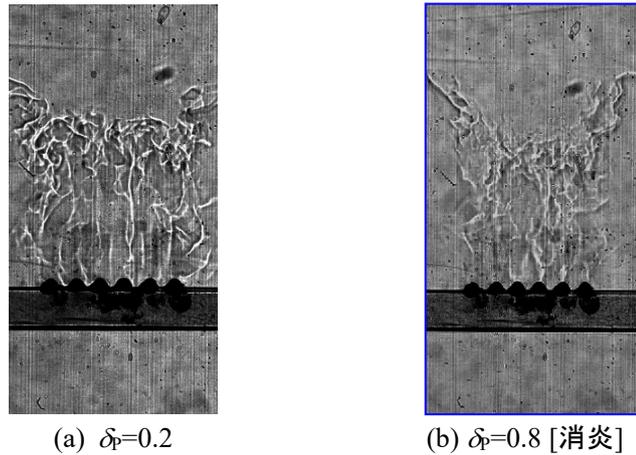


Fig.16 格子を通過する水素火炎の様子
 [Grids Distance=2 mm, $(1-\delta_p)\text{H}_2-\delta_p\text{C}_3\text{H}_8\text{-Air-N}_2/\text{O}_2$, $S_{L0}=25\text{ cm/s}$, $\Phi=0.8$]

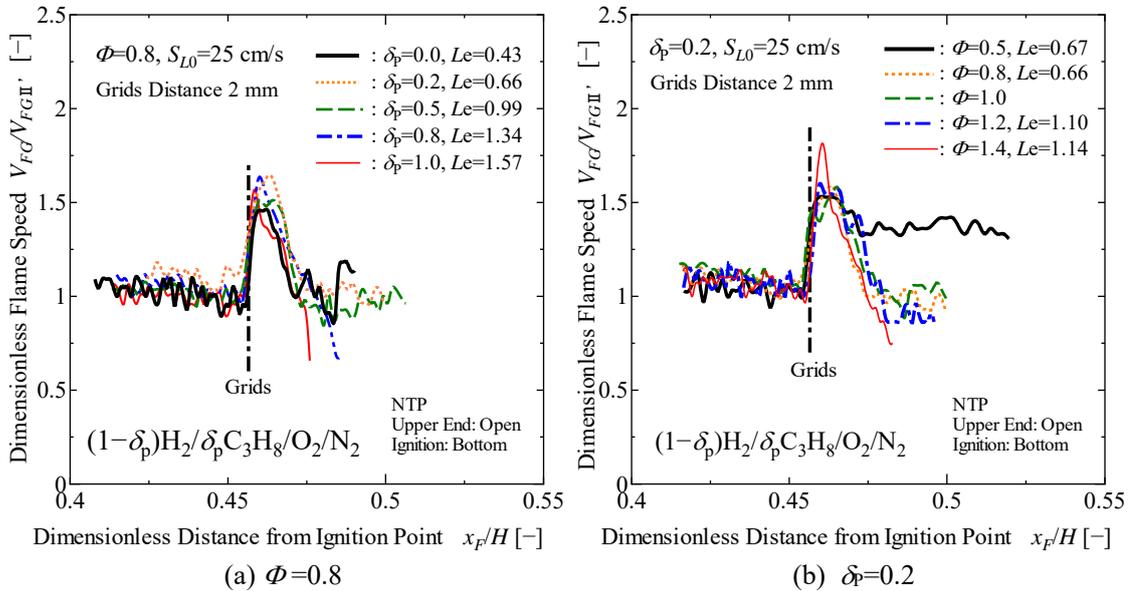


Fig.17 格子を通過する無次元火炎伝ば速度 V_{FG}/V_{FGII} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H との関係
 [Grids Distance=2 mm, $(1-\delta_p)\text{H}_2-\delta_p\text{C}_3\text{H}_8\text{-Air-N}_2/\text{O}_2$, $S_{L0}=25\text{ cm/s}$]

以上より、水素火炎に格子で能動的に曲率を与え、希釈ガスや炭化水素のもつ分子選択的拡散特性の効果を活用するために、水素が漏洩した雰囲気のリイス数および火炎形状をコントロールすることによる「水素伝ば火炎を消滅させる新爆発防止技術」を提案できる可能性があることがわかる。

最後に、上述の2成分希釈ガスおよび炭化水素燃料を単独の添加や混合ではなく両者を同時に作用させて場合について、水素伝ば火炎に与える影響およびモデルの構築の可能性を明らかにするために、 $(1-\delta_p)\text{H}_2-\delta_p\text{C}_3\text{H}_8\text{-Air}-\delta_{\text{CO}_2}\text{CO}_2-(1-\delta_{\text{CO}_2})\text{He}$ 混合気を作成し検討を行った。ここ

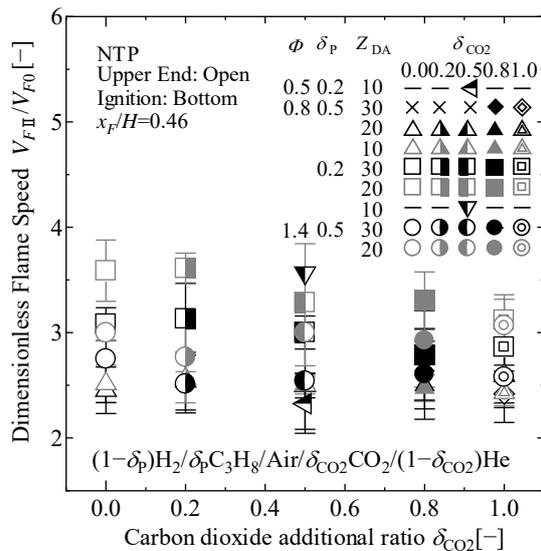


Fig.18 無次元火炎伝ば速度 V_{FII}/V_{F0} と希釈率 Z_{DA} 、 δ_P & δ_{CO2} との関係
 $[(1-\delta_P)H_2-\delta_P C_3H_8-Air-\delta_{CO2}CO_2-(1-\delta_{CO2})He]$
 $\phi = 0.5 \sim 1.4]$

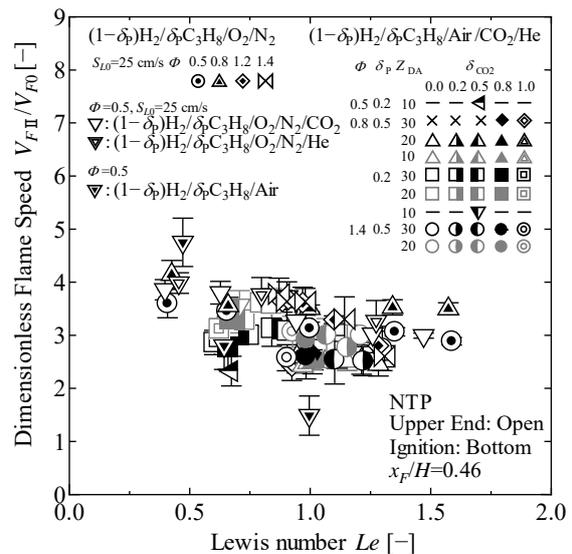


Fig.19 無次元火炎伝ば速度 V_{FII}/V_{F0} とルイス数 Le による整理

では、当量比 ϕ を0.5、0.8と1.4とし、混合気的全モル量を基準とした希釈ガスの添加割合 Z_{DA} を10から30とし、二成分希釈ガス中の二酸化炭素割合 δ_{CO2} を0.0から1.0に変化させた。なお、層流燃焼速度 S_{L0} は7~40cm/s程度に、ルイス数 Le は0.6~1.4程度の範囲で変化する。

2次元燃焼器内での火炎伝ば特性の代表値である V_{FII}/V_{F0} で整理したものを図18に示す。図18より、 $\phi=0.8$ 、 $\delta_P=0.2$ で $Z_{DA}=20$ と30の混合気では、 δ_{CO2} の増加により V_{FII}/V_{F0} は減少する傾向を示した。一方で、上記以外の混合気において、 Z_{DA} 一定では、 δ_{CO2} が増加しても V_{FII}/V_{F0} はほぼ同じ値を示した。

次に、これら混合気の V_{FII}/V_{F0} を、ルイス数 Le に対して整理したものを図19に示す。図19中には、これまでに検討した混合気も合わせて示す。

図19から、 S_{L0} が異なる混合気が混在していることからバラツキは大きいですが、 V_{FII}/V_{F0} は、 Le の増加にともない、 $Le < 1$ では概ね減少する傾向を示し、 $Le > 1$ では大きくは変化しない傾向を示すことがわかる。

以上より、図8、11および15でも議論したように、分子選択的拡散特性を表す無次元数の一つであるルイス数に着目し、さらに加えて S_{L0} の差異に起因した化学反応特性時間または予熱帯厚さを考慮することにより、水素伝ば火炎の加速および減速さらには消炎が予測できるモデルを構築できる可能性があることを明らかにできた。

本事業で得られた知見は、分子選択的拡散特性に着目することにより「水素伝ば火炎を消炎する新爆発防止技術」を開発につながるものである。

3. 業界等において今後予想される効果

分子選択的拡散特性の活用による水素爆発防止技術に関する研究

本事業により得られた成果は、既存の防火防災設備企業、水素や副生水素ならびにアンモニアを製造・貯蔵輸送・利用する化学プラントや石油精製等企業または水素ステーション、さらには原子力発電所を取り扱う電力・重工企業へ学会活動等をとおして周知することにより、提案する水素爆発防止技術の実用化が期待できる。また、本成果は、水素爆燃シミュレーションの精度向上に資するものであり、本成果を発展させ水素爆燃シミュレーションへの燃焼モデルの提供も期待できる。

さらに、本成果は水素利用社会および原子力発電利用への国民の安心・安全を担保することに貢献できるものとする。

謝 辞

本研究は競輪(JKA)の補助【補助事業番号2017M-147】を受けて実施しました。ここに記し、謝意を表す。

問い合わせ先

所属機関名： 愛媛大学 工学部(エヒメダイガク コウガクブ)

住 所： 〒790-8577

愛媛県松山市文京町3番

担 当 者： 教授 中原 真也(ナカハラ マサヤ)

担 当 部 署： 機械工学コース 熱工学研究室

(キカイコウガクコース ネットコウガクケンキュウシツ)

E-mail: nakahara.masaya.mf@ehime-u.ac.jp

URL : https://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikaiene/netu/top_j.htm