Study of the fundamental combustion properties of methane reformed fuels

学 伊福 匡博 (大分大院) 正 森 秀芳 (大分大院) ○学 井野川 周平 (大分大院)
正 田上 公俊 (大分大) 嶋田不美生 (大分大)

Masahiro Ifuku, Shuho Mori, Shuhei Inokawa, Kimitoshi Tanoue and Fumio Shimada
Oita University, Dept. of Mechanical Engineering,
700 Dannoharu, Oita 870-1192, Japan

Key Words: Methane reformed fuels, Premixed Combustion, Burning Velocity

1. 緒 論

現在, 地球規模での省エネルギー、自然環境保護の観点から内燃機関にも高効率な燃焼技術の確立が求められている。排ガス浄化の観点から現在最も関心が寄せられているのはエンジンからのコールドスタート (冷始動時) 時における未燃炭化水素 (HC) 排出の問題である⁽¹⁾。コールドスタート時には噴射された液体燃料の一部が吸気ポートの壁面に付着するため, 最適空燃比の状態を保つには過剰な燃料を供給しなければならず, 未燃炭化水素の排出量が増加する。この問題解決の有力な一手法として希薄燃焼技術が挙げられる⁽²⁾。すなわちエンジンがストイキ近くまたは希薄側で作動できればコールドスタート時にかなりの量の未燃炭化水素排気ガスが減少する。しかしながら希薄化に伴い燃焼速度低下や失火が生じるため未燃炭化水素排気ガスを増加させてしまう可能性がある。そこで安定的な希薄燃焼を実現する為, 燃料の一部を水素(H₂), 一酸化炭素(CO), 二酸化炭素(CO₂)に改質し燃焼を促進させる方法が提案されている⁽³⁾。

本研究では代替燃料として有力な天然ガスの主成分であるメタンを対象に, コールドスタート時の燃焼特性改善を目的とし, 燃料の改質が基礎燃焼特性に及ぼす影響を調べる。

2. 燃焼装置及び実験方法

2.1 燃焼装置 本実験に用いた燃焼装置は, 上下2面に直径92mmの多孔板を, 他の4面には直径92mmの観測窓を配置した内径が約100mmの球形に近い定容燃焼器⁽⁴⁾である。2個の多孔板の後方にそれぞれ独立に駆動される遠心ファンをもうけ, 多孔板中心付近の穴から混合気を噴出させ, 容器中心部にほぼ一様な乱れ場を作る。燃焼器の乱れ特性を示す乱れ強さ u' は LDV にて測定した。本研究では分圧により所定の組成で混合気を充填し, ファンによって攪拌した後, 時間において所定の乱れ強さの下で, 電極により, 中心部で点火し燃焼実験を行った。燃焼の間, 容器内の圧力器内の圧力を圧力センサーにて吸い込み, 得られた圧力履歴から燃焼速度を算出した。実験の詳細は文献⁽⁴⁾を参照のこと。

2.2 燃焼速度算出 本研究において層流燃焼速度は Lewis と Elbe の手法⁽⁵⁾により圧力上昇率から算出した。なお層流燃焼速度 S_u^0 は圧力上昇 $P=5\sim15$ [kPa] の値を平均化している。一方, 乱流燃焼速度は同様に圧力上昇率から層流燃焼速度との比として層流火炎の場合と同じ圧力範囲において $S_T/S_u^0=(dP/dt)_T/(dP/dt)_L$ により算出した⁽⁶⁾。ここで添

え字 T, L はそれぞれ乱流, 層流燃焼時の値である。

2.3 数値解析手法 解析には詳細な化学反応解析を可能にするソフトウェア CHEMKIN⁽⁷⁾を用いた。また, 伸張を受けない火炎の解析には PREMIX コードを, 燃焼温度などの平衡計算には EQUIL コードを使用した。反応機構には GRI-Mech3.0⁽⁸⁾を使用した。

2.4 混合気の設定 本研究では基準混合気となる CH₄/Air 混合気を対象に以下の水蒸気を用いた改質を想定している⁽⁹⁾。

この反応においてメタン 1mol あたり 206kJ を吸熱する。本研究では改質器の温度を 1000K と設定し, 水蒸気と炭化水素燃料の比(スチームカーボン比 以下 S/C)を 1, 2, 4 と変化させて平衡計算を行い算出した 3 種類の混合気を使用した。表 1 に当量比 $\phi=0.8, 1.3$ それぞれの混合気の組成を示す。ここで表中 T_{ad} は平衡計算により求めた断熱火炎温度, $S_u^0(exp)$ は実験により, $S_u^0(cal)$ は PREMIX により得られた層流燃焼速度である。本研究で使用した各熱物性値及び輸送係数は CHEMKIN により算出した。

Table.1 Properties of mixtures

	mol fraction [%]							$S_u^0(cal)$ [cm/s]	$S_u^0(exp)$ [cm/s]	T_{ad} [K]
	ϕ	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂			
CH ₄ /Air	0.8	7.8	0	0	0	19.4	72.9	27.7	26.57	2378
	1.3	12	0	0	0	18.5	69.5	24.36	23.31	2486
CH ₄ /H ₂ /CO/CO ₂ /Air (S/C=1)	0.8	6.8	2.9	0.1	0.6	18.8	70.8	32.52	32.83	2381
	1.3	10.3	4.5	0.2	1	17.7	66.4	33.49	30.71	2489
CH ₄ /H ₂ /CO/CO ₂ /Air (S/C=2)	0.8	6.3	4.2	0.1	1	18.6	69.8	33.87	36.06	2365
	1.3	9.5	6.4	0.2	1.6	17.3	65	38.57	39.84	2492
CH ₄ /H ₂ /CO/CO ₂ /Air (S/C=4)	0.8	5.6	6.4	0.1	1.5	18.1	68.2	39.64	43.65	2381
	1.3	8.4	9.6	0.2	2.3	16.7	62.8	46.59	46.82	2450

3. 実験結果および考察

3.1 層流燃焼速度 本研究ではまず層流燃焼速度に及ぼす改質の影響を調べた。図 1 に各当量比 ($\phi=0.7\sim1.3$) に実験結果を PREMIX による計算結果と併に示す。また図 2 に各改質混合気の S_u^0 を基準燃料である CH₄/Air 混合気で無次元化した結果を示す。図から, S/C の増加により層流燃焼速度は全域にわたり増加すること, また, その増加は過濃側で顕著であることが分かる。このことから燃料の改質は層流燃焼特性を改善する効果があることが分かる。

3.2 乱流燃焼速度 次に本研究では乱流燃焼速度に及ぼす改質の影響を調べた。図 3 に $\phi=0.8$ と 1.3 における S/C=1, 2, 4 の場合の u'/S_u^0 と S_T/S_u^0 の関係を示す。図から希薄側 ($\phi=0.8$) では S/C が増えるにつれ同一 u'/S_u^0 における S_T/S_u^0 は増加するが, 過濃側 ($\phi=1.3$) では, S/C の変化に伴う S_T/S_u^0 の変化はほとんど見られない。これは希薄領域では S/C が増加するほど混合気中の水素濃度が増加す

Fig. 1 Variations of Laminar burning velocity S_u^0 with Equivalence ratio ϕ

Fig. 2 Variations of $S_u^0 / S_u^0(\text{air})$ with Equivalence ratio ϕ

Fig. 3 Variations of S_T / S_u^0 with u' / S_u^0

るため火炎伸張による平均局所燃焼速度の低下は相対的に小さくなり、このため乱流燃焼速度が増加したものと推察される。一方、過濃側においても S/C の増加に伴い水素濃度は増加するが、これによる火炎伸張下での平均局所燃焼速度の変化は小さく、このため乱流燃焼速度の変化が小さくなったものと推察される。以上のことから燃料の改質は希薄領域の混合気に対して乱流燃焼特性を改善する効果のあることが分かる。

3.3 消炎近傍の燃焼特性 さらに本研究では、消炎限界近傍の希薄燃焼特性に及ぼす改質の影響を調べた。図4に各当量比 ($\phi=0.55, 0.5$) に対する u' / S_u^0 と S_T / S_u^0 の関係を示す。図4(a)から同一 u' / S_u^0 に対する S_T / S_u^0 は改質

することで大幅に増加することが分かる。また、CH₄/Air 混合気では u' / S_u^0 が 20 程度で消炎限界が見られるが、改質した混合気では u' / S_u^0 が 40 程度でも消炎限界が見られなかった。図4(b)から同一 u' / S_u^0 に対する S_T / S_u^0 は S/C の増加に伴い増加することが分かる。また、S/C=1 において u' / S_u^0 が 45 程度で消炎限界がみられたが S/C=2 では u' / S_u^0 が 50 程度でも消炎限界が見られなかった。以上のことから燃料の改質は消炎限界近傍の混合気に対して燃焼特性を改善する効果があることが分かる。

謝辞

本研究の遂行にあたって本学4年市原諭吉君の協力があつたことを付記して謝意を表する。

参考文献

- (1) Henein, N. A., Tagomori M. K., Progress in Energy and Combustion Science 25(1999) 563-593
- (2) Heywood, J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill(1988)
- (3) Huang, Y., Sung, C.J., Eng. Combust. Flame, 139(2004), 239-251.
- (4) Tanoue, K., et al, JSME Int. J. Series B, Vol.46, pp.416-424, (2003)
- (5) Baskin, V.S., Babushok, V.I. and Suyushev, V. A., Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol.13:291-295(1978)
- (6) G., Combustion, Flames, and Explosions of Gases, 3rd ed., (1987), Academic Press, pp.381-395.
- (7) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A. et al., Chemkin Collection, Release 3.5 (1999), Reaction Design, Inc.
- (8) Bowman, C.T, Hanson, R.K., Davison, Gardiner, Jr., Lissianski, V., Smith, G.P., Golden, D.m., Frenklach, M. and Goldenberg, M., <http://euler.me.Berkeley.edu/gri-mach/>
- (9) 中垣隆雄, 設計工学, 37-12, (2002), 620-625

(a) $\phi = 0.55$

(b) $\phi = 0.5$

Fig. 4. Variations of S_T / S_u^0 with u' / S_u^0