-臨界火炎半径に基づく解析-

日大生産工

| | 日大生産工(院) | ○林 渓太 |
|-------|----------|-------|
| 髙橋 栄一 | 日大生産工 | 秋濱 一弘 |

1. 緒言

近年,地球温暖化を背景として,化石燃料の 代替燃料であるe-fuelが注目されている.efuelは再生可能エネルギー由来の電力によっ て生成した水素と,大気や工場から回収された 二酸化炭素から合成されるカーボンニュート ラル燃料である.

e-fuelは国内外で多くの研究が進められてい るが、その合成方法によって様々な候補があり、 基本的にはフィッシャートロプシュ(FT)合成 による炭化水素系、あるいはメタノール合成を 経由する含酸素系燃料などがある.従って将来 のe-fuelの導入普及に向けて、この広範な候補 となる油種の燃焼特性について調べることは 重要となる.

最小点火エネルギー (Minimum Ignition Energy: MIE) はその基本的な燃焼特性の一 つである.これまでの研究において, Calcote らは実験的に得られた最小点火エネルギーの 消炎距離に対するスケーリング則を導いた[1]. 後述するが,他にもこれまでに消炎距離の関数 とした最小点火エネルギーのモデル式も提案 されている[2].

一方,我々のMIEに関する研究において,炭 化水素燃料としてiso-Octane(iC₈H₁₈)を含酸素 燃料としてDimethyl Carbonate(DMC)を混合 した燃料のMIEと消炎距離の関係を実験的に 評価したところ,DMC混合割合の増大に伴っ てMIEは低下したが,消炎距離はほぼ一定値と なり,上記スケーリング則の依存性とは異なる 振る舞いを示す実験例を得た[3].このことか ら,様々な組成,性状を有するe-fuel候補燃料 のMIEに対して,消炎距離よりも関数として適 切な燃焼パラメータが存在する可能性がある と考えられる.

そこで本研究ではその様なパラメータとして, Kimらにより提唱された火炎が自律的に伝播していくために必要な最小の火炎半径である臨界火炎半径に着目した[4]. この臨界火炎 半径を後述するいくつかのMIEモデルにおけ る消炎距離の代わりに用いることで得られる MIE値と実験的に得られた値を比較すること で,消炎距離と臨界火炎半径のどちらがMIEの スケーリング則として適したパラメータであ るかの評価を実施した.

実験方法・装置およびMIEモデル

2.1. 最小点火エネルギー評価実験

Fig. 1に代表的なMIE評価実験結果と定容 容器内部の電極構成図を示す. 右上の模式図は 定容容器表しており,容器内部に放電面に石英 フランジを有するASTME582-07[5]に準拠し た対向電極が設置されている. 石英フランジの 中央部には金属電極が露出しており,放電は金 属電極間で形成される. フランジ付き電極を用 いることによって消炎距離を明確に評価する ことができる. 電極間距離dは片側の電極の位 置をマイクロメーターで計測しながら移動す ることによって調整した. 放電エネルギーは可 変容量コンデンサの電極間隔を調整すること によって調整した.





MIE評価実験例を示したFig.1の縦軸は放電 エネルギー,横軸は電極間距離であり,○は点 火,×は失火した実験点を示している.波線は その境界をフリーハンドで描いたものである. 最小点火エネルギーは図中横向きの破線で表

Study on minimum ignition energy of liquid fuels — Analysis based on critical flame radius —

Keita HAYASHI, Eiichi TAKAHASHI and Kazuhiro AKIHAMA

した,最小のエネルギーで点火した値とその電 極間距離における最大のエネルギーで失火し た値の平均値とした.消炎距離は図中縦方向の 破線で示したMIEよりも1mJ以上大きいエネ ルギーにおいて,最短で点火する電極間距離と 最長で失火する電極間距離の平均値とした.

2.2. 球状火炎と臨界火炎半径

Fig. 2に代表的な球状火炎直径の時間的な 成長履歴から導かれた火炎速度 S_b と火炎伸長 率 κ の関係を示す.右上の模式図は対向電極と 球状火炎を表しており,火炎の可視化にはシュ リーレン光学系と高速度カメラを用いた.火炎 伸長率が0の極限値である火炎伝播速度 S_b^0 と マークシュタイン長さ L_b は図中の〇でマーク されているデータ点に対して以下の非線形式 をフィッティングすることにより算出した.

$$\left(\frac{S_b}{S_b^0}\right) \ln \left(\frac{S_b}{S_b^0}\right)^2 = 2 \frac{L_b \kappa}{S_b^0} \tag{1}$$

求めた火炎伸長率が0の極限としての火炎伝播 速度 S_b^0 に対して未燃ガス密度 ρ_u と既燃ガス密 度 ρ_b の比率から,層流燃焼速度 S_u^0 を算出した.





臨界火炎半径は火炎を自律的に伝播させる ために必要な最小の火炎半径である. Santnerらは臨界火炎半径の定義の一つとし て、火炎の再加速と定常伝播火炎領域の間にお ける境界値とした[6].本研究における臨界火 炎半径は、Santnerの定義に近く、上述の層流 燃焼速度 S_u^0 を評価するために使用した(1)の関 数において火炎伸長率の極大値を臨界火炎半 径とした(Fig. 2における☆の地点).具体的な 臨界火炎半径 r_c は最大火炎伸長率 κ_{max} とその ときの火炎伸長率における火炎速度 $S_b^{\kappa_{max}}$ から 以下の様に求めた.

$$r_C = \frac{S_b^{\kappa_{max}}}{\kappa_{max}} \tag{2}$$

2.3. 最小点火エネルギーのモデル式

これまでMIEのモデルはLewisらによって 消炎距離の関数としたモデル式が示された[2]. 1つ目のモデル式MIE1₀は混合気を点火する ために必要なMIEは、消炎距離程度の半径を有 する混合気を火炎温度まで加熱するのに必要 なエネルギーに等しいことを表しており、具体 的には以下の様になる.

$$MIE1_{Q} = \frac{1}{6}\pi d^{3}\rho_{b}C_{av}(T_{b} - T_{u})$$
(3)

ここでd, ρ_b , C_{av} , T_b , T_u はそれぞれ, 消炎距離, 既燃ガス密度, 平均熱容量, 既燃ガス温度, 未燃ガス温度である. 2つ目のモデル式 $MIE2_Q$ は初期の最小火炎核が伝播するためには, 反応熱と火炎面からの熱損失が等しいとして, 以下の様に表される.

$$MIE2_Q = \pi d^2 \frac{\lambda_{av}(T_b - T_u)}{S_{av}}$$
(4)

ここで*λ_{av}*, *S_{av}*はそれぞれ, 火炎前後の未燃ガ スと既燃ガスの値を平均した熱伝導率, および 速度である. なおKondoらによってこの2つの モデル式を用いて炭化水素燃料を中心とした 様々な単体燃料の実験値との比較が行われた が, 2つのモデル式はともに実験値より大きい 値が得られたが, 線形関係が得られたことが報 告されている[7].

3. 結果および考察

MIEに対する臨界火炎半径の影響を評価す るために、前述した消炎距離を用いた2つのモ デル式MIE1_QとMIE2_Qから求められた値、並 びに同式の消炎距離を臨界火炎半径で置き換 えて得られた2つのモデル式MIE1_cとMIE2_cか ら求められた値の計4つとMIE実験値との比 較を行った.それぞれのモデル式に対して使用 したパラメータは消炎距離と臨界火炎半径と 火炎伝播速度と層流燃焼速度は実験値を用い、 それ以外のパラメータは組成が分かっている 燃料の素反応モデルから求めた.

比較した燃料はiC₈H₁₈, DMC, Ethanolの単 体燃料とiC₈H₁₈に対してDMCを体積割合で 25%, 50%, 75%と混合した燃料, iC₈H₁₈に対 してEthanolを体積割合で25%, 50%, 75%と 混合した燃料である.またそのほかの実験条件 は当量比を1, 未燃ガス温度を360K, 圧力を 0.1MPaとした.

Fig. 3にMIE実験値と消炎距離を用いた2つ のモデル式の値を比較した結果を示す. 図から 分かる様に, △で示したiCsH18とEthanol混合 燃料においてはどちらのモデル式においても 線形的な振る舞いを示した. 一方, ○で示した iC₈H₁₈とDMC混合燃料では,前報の研究同様 にDMCの混合割合の増大に応じて最小点火エ ネルギーが低下したが,消炎距離はほとんど一 定であったため,両者とも比例関係にはならな かった.

一方,Fig.4にMIE実験値と臨界火炎半径を 用いた2つのモデル式の値を比較した結果を示 す.図から分かる様にiCsH18とEthanol混合燃 料とiCsH18とDMC混合燃料ともにFig.3で得 た消炎距離を用いた値よりも大きくなったが, iCsH18とEthanol混合燃料だけではなくDMC 混合燃料においても線形的な振る舞いを示し ている.

以上のことからMIEを求めるモデル式にお いて臨界火炎半径を消炎距離の代わりのパラ メータとして用いることにより実験値とモデ ル値の間に線形関係が得られるため,パラメー タとして適していることが分かった.一方,臨 界火炎半径を用いてもモデル式が算出する値 は実験値と数倍のずれがある.より適切な臨界 火炎半径の検討などが必要であると考えられ る.



Fig. 3 Comparison results of minimum ignition energy from experiment and model equation for quenching distance



Fig. 4 Comparison results of minimum ignition energy from experiment and model equation for critical flame radius

4. 結言

MIEのモデルにおいて従来の消炎距離に代わって臨界火炎半径を用いて求めた値と実験値との比較を行った.その結果以下の様な知見を得た.

- iC₈H₁₈とEthanol混合燃料において、消炎 距離を用いてモデル式から求められた MIEと実験値には比例関係が得られたが、 iC₈H₁₈とDMC混合燃料ではその様な関係 が得られなかった
- 一方,臨界火炎半径を用いてモデル式から 求められたMIEはiC₈H₁₈とEthanol混合 燃料,およびiC₈H₁₈とDMC混合燃料とも に実験値に対して線形関係を得ることが できた.
- 今回の混合燃料のMIEに対しては臨界火 炎半径が良いパラメータであることが分 かった。

参考文献

- 1) Calcote H, F, et. al., Ind. Eng. Chem. 44: 1952: 2656-2662 (1952).
- Lewis B, von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases, vol. 36. New York: Academic Press: 1961.
- 3) 林渓太,髙橋栄一,秋濱一弘,炭化水素燃料に対する含酸素燃料混合による最小点火 エネルギーへの影響,日本大学生産工学部 第56回学術講演会講演概要,(2023),pp. 243-244.
- 4) Kim H, H, et. al., Proc. Combust. Inst. 34 :929-936(2013)
- 5) ASTM E582-07 (2013).
- Santner J, S, et. al., Proc. Combust. Inst. 36 :1457-1465(2017).
- 7) Kondo, S., et al., J. Hazard Mater. 103: 11-23 (2003).