

PS-7 微小燃料噴霧の着火過程に及ぼす希薄化進展の影響

環境・動力系 * 川内 智詞, 今井 康雄, 高木 正英

1. はじめに

近年, DF (Dual Fuel) タイプのガスエンジンの点火源となる液体燃料量の低減は, 排気改善の観点から求められているが, その一方で, 燃焼安定性を低下させる一因となると考えられている⁽¹⁾. 微量の燃料噴射であっても確実な着火を可能にするため, 微小噴霧の着火機構について理解が望まれる.

微小噴霧の場合, 噴射期間の短縮によって噴射終了後に着火に至ることも想定される. 近年の研究から, 噴射期間終了後に噴霧混合気の希薄化が急速に進むことが明らかにされており⁽²⁾, これが着火に影響を及ぼすことが予想されるが, 微小噴霧の混合気形成過程と着火過程の関係について調べた研究は少ない. そこで, 本研究では, 微小噴霧の混合気形成と着火過程を模擬した計算モデルを構築し, 燃料噴射条件が着火遅れに与える影響について, 微小噴霧において顕在化しやすい噴射終了後の噴霧の希薄化の進展に着目して考察した.

2. 計算モデル

本研究では, Musculus および Kattke の 1 次元噴霧モデル⁽³⁾に, 化学反応計算を連成した Knox らの解析手法⁽⁴⁾を採用した. Musculus-Kattke のモデルは, 噴霧角を θ とする円錐形状の計算領域を軸方向に分割し, 燃料質量, 運動量の移流方程式を各検査体積で解くことによって, 噴霧軸方向の濃度分布の時間進展を求めるものである. このモデルを着火過程の予測に応用するため, 化学種とエンタルピの移流方程式を導入する. 追加された二つの移流方程式を各検査体積で解くことによって化学種濃度及びエンタルピが求まると, 定圧条件を仮定した反応解析によって化学種濃度と温度が更新される.

本モデルにおいて反応解析で使用する熱力学データおよび反応速度の計算には Cantera を使用した. 液体燃料は heptane (C_7H_{16}) とし, その詳細反応モデルは, 三好によって開発された KUCRS⁽⁴⁾で生成した. 計算領域は 120mm の長さとし, 空間, 時間の刻み幅をそれぞれ $\Delta x=0.5\text{mm}$, $\Delta t=1\mu\text{s}$ に設定して, 計算を行った.

3. 結果と考察

噴射条件を変更した数値解析を行い, 噴霧内への周囲気体の導入特性が微小噴霧の着火過程に与える影響について調査した. 噴射圧力 p_{inj} は 30, 60, 90, 120MPa, 噴孔径 d_N は 0.3mm とし, 各噴射圧力に対して燃料噴射量 m_{inj} が 3mg となるように噴射期間を調整した. 各噴射圧力に対応する燃料噴射期間 Δt_{inj} は, 噴射圧力の低い方から順に 0.54, 0.42, 0.36,

0.33ms である. 周囲気体のメタン当量比 ϕ_{CH_4} (空気過剰率 λ_{CH_4}) は, 希薄ガスエンジンの運転条件に相当する 0.56 ($\lambda_{CH_4} \approx 1.8$) とし, 雰囲気圧力 P_{amb} , 温度 T_{amb} はそれぞれ 4.6MPa, 820K とした. 各噴射条件で得られた着火遅れの結果を図-1 に示す. なお, 着火遅れ期間 τ_{ign} は, 混合気温度が熱炎反応の開始温度とされる 1150K⁽⁵⁾に達した時刻として定義した. 着火遅れに与える噴射圧力の影響は大きく, 噴射圧力の増加によって着火遅れが長期化した. 以降, 得られた結果に対して, 周囲気体の導入過程と噴霧の希薄化の進展に着目して考察を行った.

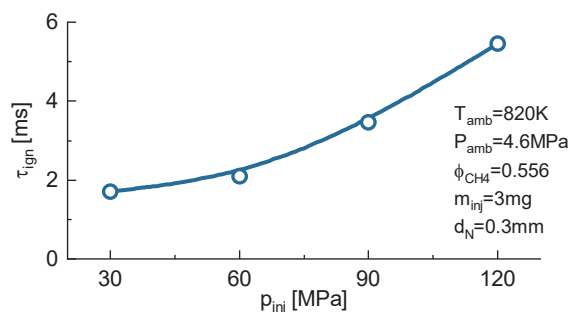
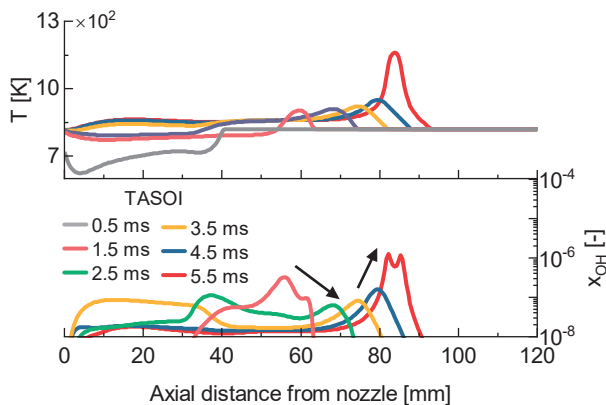


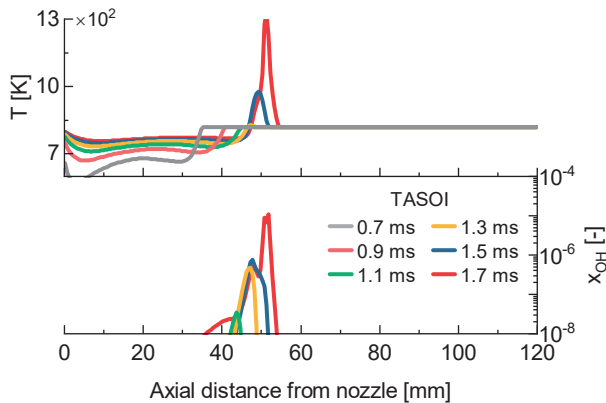
図-1 噴射圧力が着火遅れに及ぼす影響

図-1 で特徴的な傾向が見られた二つの条件, $p_{inj}=120\text{MPa}$ (Case A), $p_{inj}=30\text{MPa}$ (Case B) について, 着火に至るまでの過程を明示するため, 図-2 に, 噴霧軸方向の温度と OH ラジカルのモル分率の分布を示す. 着火遅れの長期化した Case A では, 雰囲気温度である 820K から 100K 程度上昇した後, 数 ms 程度の期間を経て大幅な温度上昇に至る熱炎が噴霧先端部で確認される. また, Case A では $t=1.5\text{ms}$ において OH ラジカルの増加を確認できるが, その後, 時間の経過に伴い減少に転じ, 熱炎に移行する時期に再び急増する. このような OH ラジカルの時間推移は, 着火遅れの短い Case B では確認されなかった. したがって, 一度増加した OH ラジカルが減少に転じたことが着火遅れを長期化させた一因であると考え, 周囲気体の導入過程からその要因について検討した. 図-3 は, 噴霧軸方向の各位置における単位燃料質量あたりの周囲気体の導入率 (以降, エントレインメント率とする) を示す. 高噴射圧力に伴う到達距離の増加によって, Case A の方が Case B よりもエントレインメント率が増加していることがわかる. 次に, この差が着火のしやすさにどのように影響を及ぼしているか調査した. 図-2 に示すように, 各条件に共通して噴霧先端部付近で着火が生じたことから, 噴霧先端位置の 80% から先端位置までに存在している混合気の平均当量比, 温度を求め, それらを用いて着火遅れを計

算した。結果を図-4に示す。なお、グラフ中に示す点線は、 $t=\tau_{ign}$ を示しており、 $t<\tau_{ign}$ の場合、噴射を開始してからの経過時間よりも短い時間で着火に至る能力を有した混合気となっていると解釈され、混合気の着火能の目安として示している。噴射開始直後は、周囲気体との混合が十分でなく温度が低くなるため、 τ_{ign} は大きくなっている。時間の経過に伴い、周囲気体との混合が進むことから、当量比は減少、温度が上昇する。それによって、 τ_{ign} も減少を続け、 τ_{ign} が最小、すなわち、その噴射条件で形成される噴霧混合気にとって最も着火しやすい条件に至る。その後も噴霧の希薄化は続くため、 τ_{ign} は増加に転ずる。着火遅れの短いCase Bでは、エントレインメント率の低い噴射条件となることから、噴霧混合気の温度上昇に時間を要する。そのため、 $t=1\text{ms}$ までは同時刻のCase Aと比較して τ_{ign} は長くなっているが、その後は、そのエントレインメント率の低さによって希薄化の進行が抑えられ、噴霧混合気の着火性が維持される。一方で、Case Aでは高エントレインメント率によって噴霧の希薄化が急速に進展するため、Case Bよりも τ_{ign} の増加率が大きいことがわかる。 τ_{ign} が極小値に向かう過程で着火の前駆物質の濃度は増加し、その時期に着火に至らなければ、その後の希薄化の進展によって、蓄積された着火の前駆物質の濃度が減少すると考えると、着火遅れの長期化したCase Aにおいて、OHラジカルが減少に転じた挙動について説明がつく。



(a) Case A ($p_{inj}=120\text{MPa}, \Delta t_{inj}=0.33\text{ms}$)



(b) Case B ($p_{inj}=30\text{MPa}, \Delta t_{inj}=0.54\text{ms}$)

図-2 噴霧軸方向における温度及びOHラジカルのモル分率の分布

まとめ

本研究で得られた結果は、以下のとおりである。

- 微小噴霧の着火遅れは、周囲気体の導入率を促進する噴射圧力の高い条件ほど、長期化した。
- OHラジカルの濃度の時間推移に、噴射期間終了後のエントレインメント率の増加が影響し、それが着火遅れの長期化に関与することが示された。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP18K04591の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) Constantin Kiesling, et al. : CIMAC Congress 2016, Paper No. 078 (2016)
- (2) Mark P. B. Musculus, et al. : SAE Int. J. Engines, Vol.2, No.1, p.1170-1193 (2009)
- (3) Benjamin W Knox, et al. : Int. J. Engine Research, Vol.17, No.3, p.261-279 (2016)
- (4) <http://www.frad.t.u-tokyo.ac.jp/~miyoshi/KUCRS/>
- (5) 柴田元：機論(B編), Vol.77, No.775, p.894-903 (2011)

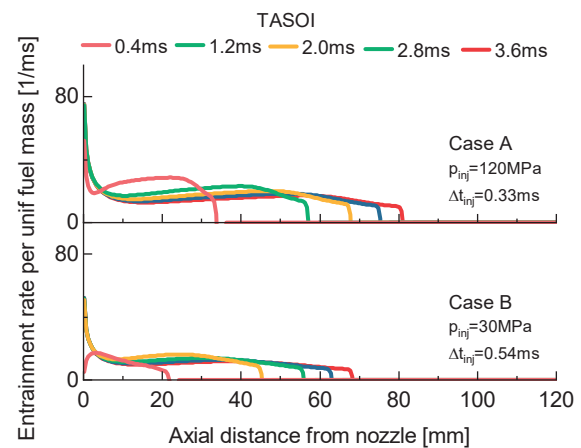


図-3 噴霧軸方向におけるエントレインメント率の分布

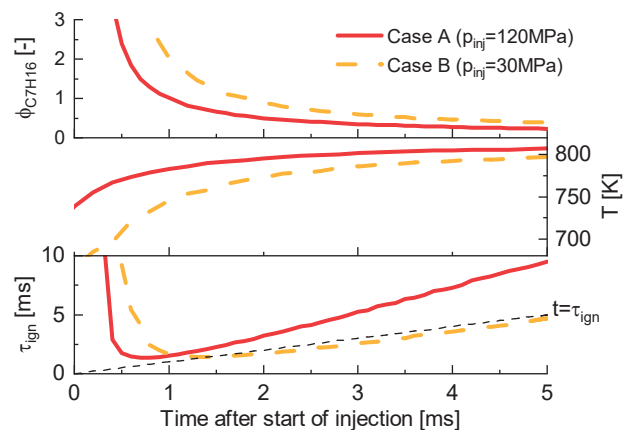


図-4 噴霧先端部の混合気の状態から予測される着火遅れ