

数値シミュレーションによる液滴群要素の着火・燃え広がりに関する研究

河本, 晃士
九州大学総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7178594>

出版情報 : 九州大学, 2023, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :

数値シミュレーションによる液滴群要素の着火・燃え広がりに関する研究

エネルギー熱物理科学研究室 河本 晃士

1. 緒言

噴霧燃焼はジェットエンジン、油焚、ディーゼルエンジンといった多くの燃焼器に使われており、液体燃料の噴霧化、液滴の分散、燃料の蒸発、そして化学反応が同時に進む複雑な現象である。^[1]噴霧燃焼を連続的で安定に制御するためには噴霧火炎の基部で見られる群燃焼と呼ばれる複数の噴霧液滴が全体的に燃える現象を再現する必要があるが、未だに詳細な発現メカニズムは解明されていない。

エンジンの開発において燃焼過程の数値シミュレーションの重要度が増しつつある。液滴間の火炎の燃え広がりや群燃焼の発生過程を適切に取り扱うことができるモデルの構築のため、液滴間燃え広がりを通して得られる液滴燃焼の知見を複雑な噴霧燃焼の理解へ繋げることが必要である。

Mikami ら^[1,3-5]のランダム分散液滴群の燃え広がりや群燃焼発現メカニズムに関する燃焼実験では群燃焼発生限界で未燃液滴群が急に燃え始める大規模着火現象という予期しない現象が観測された。これを解明するため、燃え広がり限界の外側に存在する未燃液滴が群火炎によって加熱されて形成された冷炎が作用し、大規模な着火現象が生じたと仮定し、検証実験^[6]が行われた。

本研究では、予熱により液滴群要素周辺に形成された予混合気の有無による液滴群要素の火炎伝播挙動の相違を数値シミュレーションによって比較し、冷炎・予混合気が着火・燃え広がり過程に与える影響を調査することを目的とする。

2. 計算手法

2.1 支配方程式

気相の支配方程式^[10]を表 1 に示す。

表 1 気相の支配方程式

質量	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = S_m$
運動量	$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + P \delta_{ij} - \sigma_{ij}) - \rho g_i = S_{ui}$
エネルギー	$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j h - \rho a \frac{\partial h}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^n h_k (\rho a - \rho D_k) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right] = S_h$
化学種の質量分率	$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k - \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}) = S_{combu,k} + S_{Y_k}$

燃料液滴はラグランジュ法によって個別に追跡される。液滴の支配方程式^[10]を表 2 に示す。

表 2 液滴の支配方程式

温度	$\frac{dT_d}{dt} = \frac{Q_d + (dm_d/dt)L_v + Q_{rad,d}}{m_d c_{p,d}}$
質量	$\frac{dm_d}{dt} = -\frac{Sh}{3Sc} \frac{m_d}{\tau_d} \ln(1+B_M)$

2.2 計算条件

本研究の燃料液滴として正デカンを用いる。数値解析手法は直接数値計算 (DNS) を採用し、72 化学種、280 素反応を計算する。燃焼解析コードは FFR-Comb、輻射モデルは discrete ordinate 法^[8]、蒸発モデルは非平衡 Langmuir-Knudsen モデル^[7]が用いられている。

初期条件および計算領域を表 3 に示す。

表 3 初期条件および計算領域

時間刻み	10 μ s
初期温度	293 K
初期圧力	0.1 MPa
節点数	1289151
要素数	1263744
計算領域	立方体 -140 < x < 140 -162 < y < 162 -100 < z < 100

図 1 に燃焼ケースの液滴配置を示す。液滴 I の着火からクラスター L へ火炎が伝播する直前のクラスター H による予熱の有無で 2 条件を比較する。予熱しない場合を case 1、予熱した場合を case 2 とする。各液滴の直径は 1 mm であり、クラスター H のみ 2 mm とする。液滴の座標を表 4 に示す。

表 4 液滴の座標

	x[mm]	y[mm]
droplet I	0	16
droplet L1	0	-4
droplet L2	-4	0
droplet L3	0	0
droplet L4	4	0
droplet L5	0	4
cluster H1	0	-36
cluster H2	0	-32

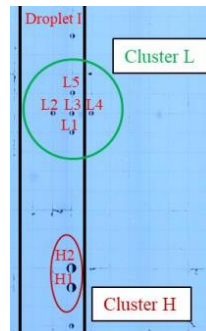
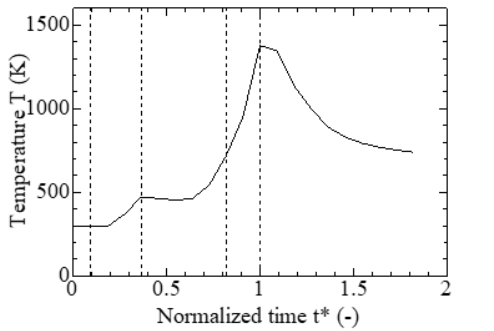


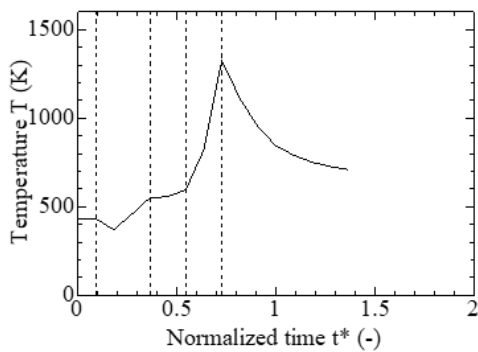
図 1 燃焼ケースの液滴配置

3. 結果と考察

液滴 L1 の 1 mm 下の位置における温度と冷炎の発生時等の低温酸化反応において生成される CH_2O の時間変化を図 2 および図 3 に示す。

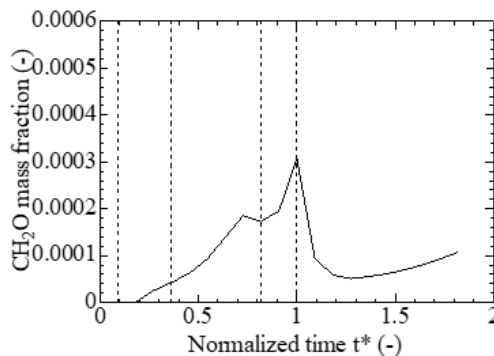


(a)case1

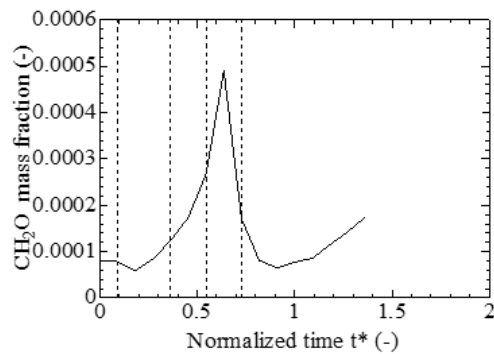


(b)case2

図 2 温度の時間変化



(a)case1



(b)case2

図 3 CH_2O の時間変化

燃焼ケースの case2 においてはクラスター H による予熱によってクラスター L の予蒸発が起こっており、液滴 L1 は case1 より着火が約 30 % 早まった。液滴 L1 の 1 mm 下の位置において液滴 L1 の蒸発の直前に CH_2O がピークを迎えており、低温酸化反応が促進されていることが分かる。

4. 結言

Mikami ら^[1,3-5]の燃焼実験で観測された大規模着火現象の現象理解をするために本研究では、予熱された液滴群要素周辺に形成された予混合気の有無による火炎伝播挙動の調査(燃焼ケース)を数値シミュレーションによって行った。

燃え広がり限界の外側に位置する液滴群要素が予混合気によって着火時期を促進させることが数値計算で再現できた。本成果を基に低温酸化反応によって液滴が着火するモデルの構築が実現すれば、大規模着火現象といった複雑な群燃焼の発生過程を数値計算で考慮することができるのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] M. Mikami, M. Kikuchi, Y. Kan, T. Seo, H. Nomura, Y. Suganuma, O. Moriue, D.L. Dietrich: International Journal of Microgravity Science and Application, 33(2) (2016) 330208.
- [2] Y. Yoshida, K. Iwai, K. Nagata, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura: Proceedings of the Combustion Institute, 37(3) (2019) 3409.
- [3] M. Mikami, H. Nomura, Y. Suganuma, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura: International Journal of Microgravity Science and Application, 35(2) (2018) 350202.
- [4] M. Mikami, Y. Yoshida, T. Seo, T. Sakashita, M. Kikuchi, T. Suzuki, M. Nokura: Microgravity Science and Technology, 30(4) (2018) 535.
- [5] M. Mikami, Y. Yoshida, M. Kikuchi, D.L. Dietrich: 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, (July. 1.-5.2019) Paper No. ASPACC2019-1504.
- [6] K. Matsumoto, Y. Yoshida, M. Mikami, M. Kikuchi: 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, (2019).
- [7] R.S. Miller, J. Bellan: Direct numerical simulation of a confined three-dimensional gas mixing layer with one evaporating hydrocarbon-droplet-laden stream, J. Fluid Mech, (1999) 384, 293-338
- [8] W.A. Fiveland: Three-dimensional radiative heat transfer solutions by discrete-ordinates method, J. Thermophys (1988) 2, 309-316
- [9] M. Mikami, H. Saputro, H. Oyagi: Microgravity-science and Technology, (2018).
- [10] H. Watanabe, R. Kurose, S. Komori, H. Pitsch: Combustion and Flame 152(2008)2-13