

極超音速統合制御実験 (HIMICO) 用ラム燃焼器内の
自己着火現象に関する詳細反応機構を考慮した数値解析

小松 湧介(早稲田大学大学院機械科学専攻), 佐藤 哲也(早稲田大学機械科学・航空学科),
溝渕 泰寛, 南部 太介, 田口 秀之(宇宙航空研究開発機構)

Numerical Simulation of Self-ignition with Detailed Chemical Kinetics
in Ram Combustor for High-Mach Integrated Control Experiment (HIMICO)

Yusuke Komatsu (Department of Applied Mechanics, Waseda University), Tetsuya Sato (Department of Applied
Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University), Yasuhiro Mizobuchi, Taisuke Nambu, Hideyuki
Taguchi (Japan Aerospace Exploration Agency)

概要: 著者らは, 極超音速統合制御実験用ラム燃焼器内の自己着火現象の解明と自己着火限界の予測を目的として, 有限反応速度モデルを採用した反応性流体解析ソルバを開発し, 実機スケールの燃焼器を対象として水素-空気9化学種23反応を考慮したLESを行っている. 自己着火の発生メカニズムの調査や, 燃焼器に流入する空気の温度や流速の違いによる影響の調査を行い, 自己着火限界の予測について一定の知見を得た.

1. 研究背景・目的

極超音速旅客機の実用化に向けて極超音速統合制御実験 (HIMICO) 計画を, JAXA と大学が連携して進めている. この計画では極超音速条件下での機体姿勢とエンジンの統合制御技術の確立を目的としている. 実験機に搭載されるラムジェットエンジンの燃焼器については, 現在までに行われた燃焼実験で, 実験条件によっては燃料の自己着火が起きることが確認されている[1]が, 自己着火が起きる場合の空気や水素の流入条件 (温度・流速) については定量的な評価が不十分である. そこで本研究では, 詳細な化学反応機構を考慮できる反応性流体解析ソルバを開発し, LES (Large-eddy simulation) による数値解析によって燃焼器内での自己着火現象の解明および自己着火限界の予測を行うことを目的とする.

2. 数値解析手法

本研究では, JAXA が開発した圧縮性流体解析ソルバ FaSTAR をベースに開発した反応性流体解析ソルバを用いて LES による数値解析を行った. 支配方程式は 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式であり, SGS モデルとしては Smagorinsky-Lilly モデルを採用した. 化学反応生成項の算出には有限反応速度モデルを採用し, 水素-空気 9 化学種 23 反応[2]を考慮した. 乱流と化学反応の相互作用を表現するモデルとしては PaSR (Partially Stirred Reactor) モデル[3]を用いた. 解析対象は HIMICO 用ラムジェットエンジンのインジェクタを含む燃焼器部分であり, 燃料の気体水素はインジェクタから 300 K で流入する. 本研究では, 燃焼器に流入する空気の温度を 600 K から 900 K まで変えた 4 条件と実験を模擬した 2 条件で数値解析を行った. 壁面は全て断熱滑り無し条件としたが, インジェクタ外壁の境界条件の影響を調査するため, 流入する空気の温度が 800 K の条件ではインジェクタ外壁のみを 300 K の等温壁滑り無し条件にした数値解析も行った.

3. 解析結果

燃焼器に流入する空気の温度を変化させた解析の結果、空気の温度が 700 K 以上の条件では自己着火が起きた。Fig. 1 に空気の温度を 800 K とした解析における自己着火時の温度分布と当量比分布を示す。図から自己着火が起きて温度が上昇している領域はリーンな領域であることが分かる。これは、流入する水素の温度が 300 K であるため、空気が多いリーンな領域の方が混合気体の温度が高く着火遅れ時間が短いからであると考えられる。この傾向は自己着火が起きた他の条件でも同じであった。また、数値解析における自己着火までの時間と予混合を仮定して算出した着火遅れ時間を Fig. 2 に示す。着火遅れ時間は当量比を 0.05 から 2.30 まで変えて算出したが、Fig. 2 には量論混合比の時の値 (st.) と最小値 (min.) を示す。数値解析での自己着火までの時間と着火遅れ時間には強い相関があることから、自己着火までの時間は化学反応に律速されており、混合による影響は小さいことが示唆される。

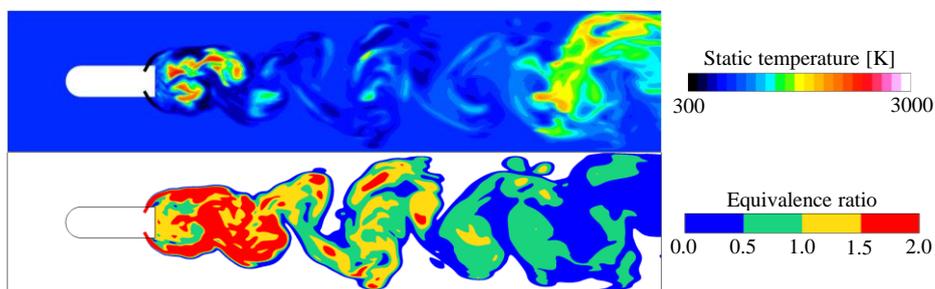


Fig. 1 Temperature and equivalence ratio distribution (800 K)

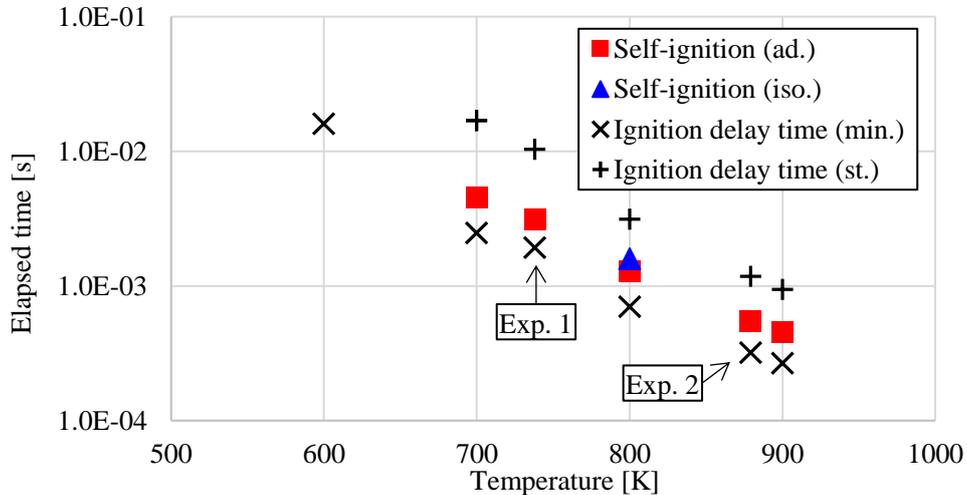


Fig. 2 Ignition delay time and time to self-ignition

Fig. 2 の三角形のプロットは空気の温度が 800 K でインジェクタ外壁を 300 K の等温壁にした解析 (iso.) での自己着火までの時間である。インジェクタ外壁を等温壁にすると断熱壁にした解析 (ad.) と比較して、自己着火までの時間が約 2.7×10^{-4} 秒間 (約 20%) 遅れた。自己着火前におけるインジェクタ背後の再循環領域の各時間ステップでの最大温度の平均値は、断熱壁の場合で 786.8 K、等温壁の場合で 739.4 K であった。インジェクタ外壁が等温壁の場合に自己着火までの時間が長くなるのは、インジェクタ背後の再循環領域での温度が下がることで化学反応の進行が遅れるためであると考えられる。また、化学反

応速度は温度で指数関数的に変化するため、空気の温度がより小さい条件では、断熱壁の場合と等温壁の場合での自己着火までの時間の差が大きくなり、自己着火限界にも影響を与えることが予想される。

Fig. 2 の Exp. 1 は実験で自己着火が起きなかった条件、Exp. 2 は実験で自己着火が起きた条件を模擬した解析結果である。どちらの条件でも数値解析では自己着火が起きた。実験と数値解析の不一致の原因としては、実験と数値解析で流れ場・温度場が異なることが考えられる。本解析では、空気の流入境界で乱れのない様な流れを仮定しているが、実験では燃焼器前方にインテークがあることによって流入する空気の流れは 3 次元的で乱れていると考えられる。本解析ではインジェクタ背面にごく近い領域では流動がほぼないことが観察されているが、流入する空気が 3 次元的で乱れていると、再循環領域の流動がより活発になり、化学反応が進んだ領域が生じて下流に流されて自己着火に至らない場合があることが予想される。また、上述の通りインジェクタ外壁の境界条件の設定によって自己着火限界が変わることも予想される。数値解析による定量的な自己着火限界の予測には、より実験に近い流れ場・温度場を再現することが必要であると考えられる。

4. 結論

極超音速統合制御実験用ラム燃焼器を対象に、自己着火現象の解明および自己着火限界の予測を目的とした LES による数値解析を行った。燃焼器に流入する空気の温度による影響とインジェクタ外壁の境界条件による影響の調査および実験結果との比較を行って次の知見を得た。

- (1) 開発した反応性流体解析ソルバを用いた LES により、自己着火限界を定性的に予測可能である。より実験に近い流れ場・温度場を再現することで、定量的な予測が可能になると考えられる。
- (2) 自己着火が起きるのは温度が高いリーンな領域である。自己着火までの時間は、水素と空気の混合による遅れよりも化学反応の遅れによる影響の方が支配的である。
- (3) インジェクタ外壁を 300 K の等温壁とすると、断熱壁とした場合と比較して自己着火が起きるまでの時間が約 20%遅れる。これはインジェクタ背後の再循環領域の温度が下がり化学反応の進行が遅れるからである。

5. 参考文献

- [1] Sato, A., Wakabayashi, S., Iwasaki, Y., Yoshida, H., Sato, T., Taguchi, H., et al., Experimental Study of Ramjet Engine for High-Mach Integrated Control Experiment (HIMICO), 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan, 2017-a-24, 2017.
- [2] Burke, M. P., Chaos, M., Ju, Y., Dryer, F. L., Klippenstein, S. J., Comprehensive H₂/O₂ Kinetic Model for High-Pressure Combustion, Int. J. Chem. Kinet., Vol. 44, Issue 7 (2012), pp. 444-474.
- [3] Karlsson, J. A. J., Modeling Auto-Ignition, Flame Propagation and Combustion in Non-Stationary Turbulent Sprays, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, 1995.