

ノズルを通過するジェット着火の数値解析

Numerical Simulation of Jet Ignition through an nozzle

浅見桂輔 (青学大) 〒157-8572 東京都世田谷区千歳台 6-16-1 青山学院大学 大学院理工学研究科
坂本健 (青学大) 〒157-8572 東京都世田谷区千歳台 6-16-1 青山学院大学 大学院理工学研究科
林光一 (青学大) 〒157-8572 東京都世田谷区千歳台 6-16-1 青山学院大学 大学院理工学研究科
Keisuke ASAMI Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University Setagaya-ku, Tokyo 157-8572, Japan
Ken SAKAMOTO Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University Setagaya-ku, Tokyo 157-8572, Japan
A.Koichi HAYASHI Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University Setagaya-ku, Tokyo 157-8572, Japan

Jet Ignition has been observed in nature and many scientific and engineering applications. Some of the typical examples are seen in flame propagation through an orifice, nozzle, and slit in chamber. In the present study for the aim of the revealing of jet ignition mechanism, we simulated numerically combustion phenomena and its flow field in a two-compartment chamber filled with a hydrogen/air premixed gas by using two-dimensional unsteady compressive Navier-Stokes equation with a 9 chemicals/19 step hydrogen/air reaction model.

1. 序論

ジェット着火とは2室以上の部屋からなる燃焼室と、それをつなぐオリフィスやノズルを持つ燃焼室内における予混合火炎が起こす現象であり、急激な燃焼速度と高い局所圧力が生じるのが特徴である。

ジェット着火は、現在までに多くの科学的、工業的分野で観測されている現象である。近年では防災目的の大規模な燃焼室を持つようなものから内燃機関への応用を目的としたものまで様々な研究がされている。防災目的としてあげられるものに原子力発電所での爆発火災事故がある。仮に大事故が発生した場合においても、水素着火の必要条件と燃焼特性を評価し原子炉の安全性を分析する事により安全なレベルで水素を制御することが出来る。内燃機関への応用としては、希薄混合気を燃焼させる着火システムとして火炎ジェットを用いることにより、通常の燃焼法において失火する条件下でも着火と安定燃焼を保持する役割を果たす。

今回の計算では燃焼室内を仕切る仕切り板にノズルを用いることによりジェット着火現象にどのような影響を与えるかを数値計算により検討した。

2. 支配方程式及び数値計算法

本解析で用いた支配方程式は、非定常圧縮性 Navier-Stokes 方程式と各化学種の質量保存式である。考慮した化学反応は酸水素反応であり、化学種数は9化学種で、 N_2 は不活性としている。数値解析法として反応による stiffness を避けるため semi-implicit 法を採用する。時間-空間精度を維持するために時間分割法を用い、各項に対しての離散化は、対流項に対して Harten-Yee の non-MUSCL modified flux type TVD scheme を、粘性項に対して2次精度中心差分を、生成項に対して Crank-Nicholson type の陰解法を用いる。化学反応には9化学種19段階の前進-後退反応からなる素反応モデルを用いる。また、複雑な燃焼器形状に対応するために、解強制置換法を応用した領域分割法を用いる。

また下室を Driver chamber, 上室を Receiver Chamber と呼ぶことにする。計算領域は Driver chamber、ノズルと Driver Chamber をつなぐ部分、ノズル、Receiver Chamber の全4領域を計算する。壁面の境界条件としては等温壁、滑りなし、非触媒性条件を与える。対称軸上には、鏡面反射条件を与える。初期条件は、圧力 101.325KPa、温度 293.15K、当量比 1.0 である。

3. 結果ならびに考察

Fig 1 は数値シミュレーションを行った結果であり、温度分布を示してある。各分布の下に示してある時間は着火してから時間あり、単位は msec である。

0.119msec は着火直後の様子である。1.271msec で火炎がノズル入り口まで到達し、1.320msec では既に高速の既燃ジェットがノズルから Receiver Chamber に噴出している様子が分かる。1.401msec では Receiver chamber 天井まで到達した火炎が今度は横方向に伝播している様子がわかる。Driver Chamber でゆっくりと進んだ火炎がノズルを通過、急激な圧力上昇を伴った燃焼というジェット着火特有の一連の燃焼形態が再現されている事が分かる。

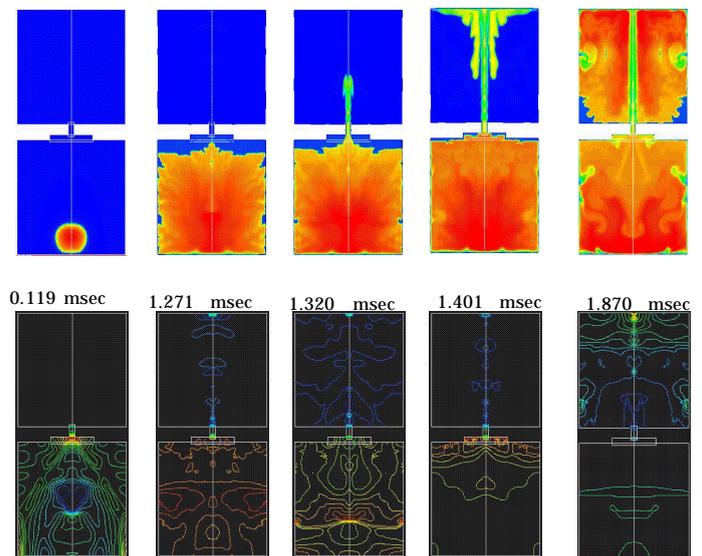


Fig 1 Temperature and pressure distributions of numerical simulation (nozzle 8mm equivalence ratio 1.0)

Fig 2 に Driver chamber および Receiver chamber での圧力履歴を示す。縦軸は両燃焼室内の壁面中央の測定点での圧力を示し、単位は Mpa である。横軸は着火してから時間であり、単位は msec である。着火してから 1.0msec まで Driver chamber 内は緩やかに圧力が上昇しているのに対し、

Receiver chamber 内はほとんど圧力上昇がみられない。また、温度分布(Fig 1)をみると 1.3msec 前後で火炎ジェットがノズルから Receiver chamber 内に噴出しているが、その後に Receiver chamber 内の圧力が上昇していることが分かる。圧力履歴からも火炎がノズルを通過後、急激な圧力上昇を伴った燃焼という Jet ignition 特有の現象が再現されている事が分かる。

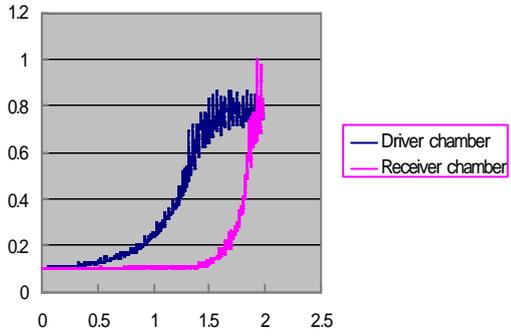


Fig 2 Pressure profiles at the both chamber (nozzle 8mm equivalence ratio 1.0)

Fig 3 に Receiver chamber 内に噴出する火炎ジェットの形成過程を示す。この図に示されているものは、火炎がノズルを通過後 Receiver chamber 内にジェットとして噴出しているものであり、中心線から右側の燃焼状態を拡大したものである。上段には速度ベクトルと温度分布が示してあり、下段には渦度の大きさが示してある。1.329msec ではジェット先端部が半径方向に伸びていく様子が確認できる。半径方向に伸びた火炎は、ノズルからの高速なジェットに引きずられるため、下方に伸長される。その結果、笠上の火炎が形成されていることがわかる。

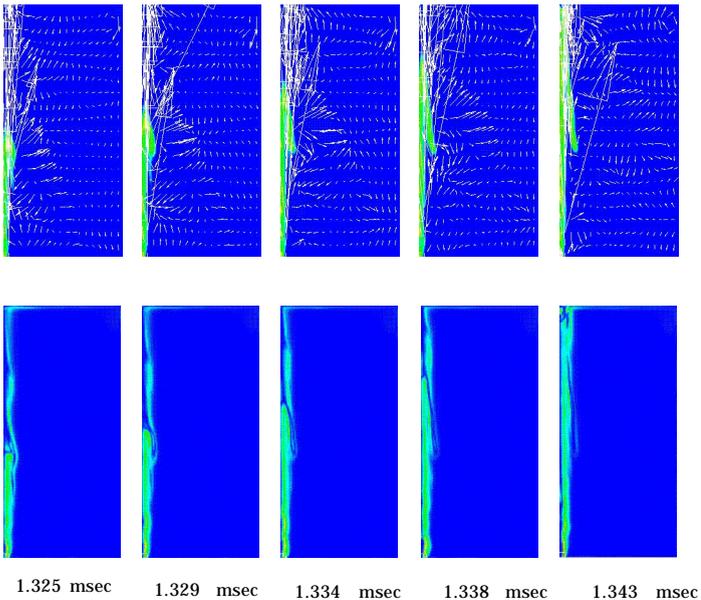


Fig 3 Temperature distribution with velocity vector and vorticity magnitude (nozzle 8mm equivalence ratio 1.0)

Fig 4 は火炎がノズルを通過後、ジェットとして Receiver chamber 内に噴出している時の様子を拡大したものであり、Receiver chamber 内の様子をを示したものである。上段が温度分布を示しており、下段は熱発生率を示している。上段の温度分布だけでは火炎ジェットの詳細な構造は分からないが、下段の熱発生率をみると、ノズルのすぐ上の部分では、消炎していることがわかる。これは、ノズルでの熱損失によるものではないかと思われる。

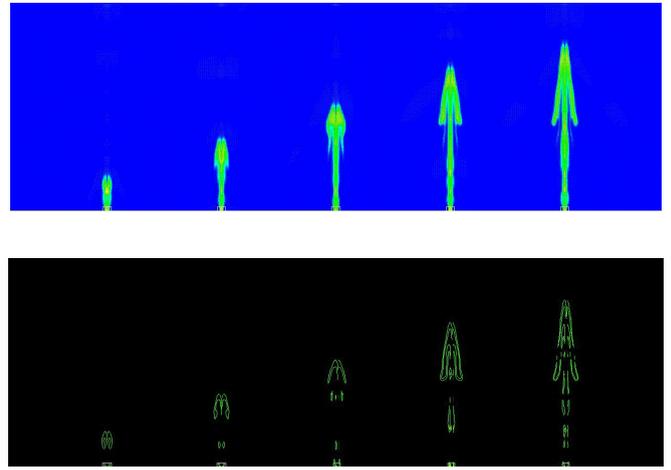


Fig 4 Temperature distribution and heat release rate (nozzle 8mm equivalence ratio 1.0)

Fig5 は、Driver chamber からノズルを通過して噴出しするノズル面平均速度の時間変化を示している。縦軸がノズル内部における平均速度で、正の値が Driver chamber から Receiver chamber への流れ方向を示し、負の値は、Receiver chamber から、Driver chamber への流れ方向を示している。横軸の値は着火してから時間であり、単位は msec になる。約 1.3msec から 1.4msec で急速に速度が増加しているが、これは火炎がノズルに進入していく時刻とほぼ一致している。また 2.0msec 近くになると今度は Receiver chamber から Driver chamber への back flow が生じていることも分かる。

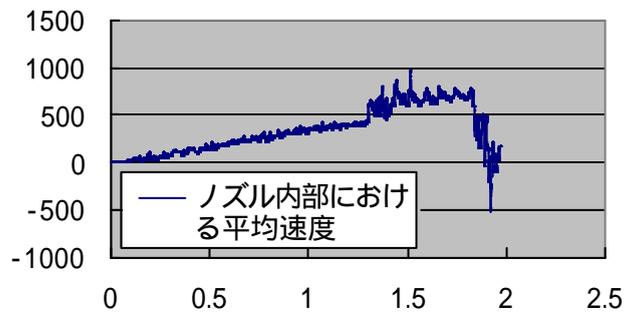


Fig 5 Velocity in the nozzle (nozzle 8mm equivalence ratio 1.0)

4. 結論

2室間の燃焼室とそれをつなぐノズルを伝播する火炎について数値計算によりシミュレーションをおこなった。それにより火炎がノズルを通過、急激な圧力上昇を伴った急速な燃焼というジェット着火特有の一連の燃焼形態が再現されていることが分かった。また実験では分からないような詳細な火炎の構造を知ることができた。

参考文献

- (1) 末武 基, “実験並びに2次元、3次元数値解析によるジェット着火の非定常解析” 第37回燃焼シンポジウム講演論文集, 1999, pp.437-438
- (2) 坂本 健「ジェット着火における燃焼形態の実験」青山学院大学卒業論文 1999
- (3) 内田 直雅「水素・空気環境におけるジェット着火機構の研究」青山学院大学修士論文 1998
- (4) 伊東 秀幸「ジェット着火機構の研究」青山学院修士論文 1997
- (5) 伊東 秀幸「ジェット着火による水素火炎伝播の測定」青山学院卒業論文 1995
- (6) Wierman, “R.W.Hydrogen jet recombination under postulated LMFBR accidents conditions” Transactions of the American Nuclear Society, pp.357-358 (1977)
- (7) Wierman, R.W.and Muhlestein, L.D."Hydrogen ignition and recombination following postulated breeder reactor accidents".Proc of the Int Meet on Fast React Saf Technol, Seattle, Wash, Aug19-23 1979 v1.Publ by ANS, LaGrange Park, Ill. pp.428-430 (1979)
- (8) Wolf,L, Rastogi,A, Wennerberg,D, Cron.T and Hansiosten.F."Detailed assessment of the HDR-hydrogen deflagration experiments E12".International Conference on New Trends in Nuclear System Thermohydraulics Proceedings. pp.105-116 vol.2 of 2vol (1994)