

総括一段反応燃焼モデルによる乱流拡散火炎の簡易シミュレーション手法の開発

千野 道洋 川上 忠重
法政大学工学部機械工学科

本研究は、燃焼現象の簡易数値解析の指針を得るために、まず手始めとして総括一段反応燃焼モデルを用いたメタン乱流拡散火炎のフレームホルダー付近での温度分布、火炎高さおよび燃料出口温度等のシミュレーションを行うことにより、簡易型数値解析シミュレーションの妥当性についての検討を行った。

1. 緒論

現在、自動車の環境規制強化の対応などで、エンジン構造の複雑化・多様化が進んでいる。また、エンジン内の現象自体についても、ピストン流動や燃料噴霧の気化、乱流燃焼などが伴う複雑な非正常現象であり、これらを詳細に解析するにあたって、数値シミュレーションは非常に有効な手段である。

現在の内燃機関や燃料電池及び燃焼現象に関する数値シミュレーションによる解析は、機関特性に及ぼす乱れの影響、燃料噴霧の液滴径とその分布、改質燃料電池の改質器の温度上昇による起動性能の低下、燃焼素反応、燃焼特性量(燃料濃度・発熱量・反応速度等)の影響を十分考慮する必要があり、計算時間の長期化により、実効力の低下を招いてしまう場合も少なくない。したがって、多くの研究者によって、局所的な部分での解析や簡易計算手法の試みがされており、今後の実用的で有用な解析手法の一つとなると考えられる。

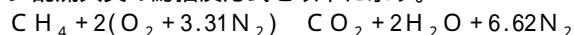
本研究では、これらの観点から燃焼現象の簡易シミュレーションの指針を得るために、その第一段階として総括一段反応燃焼モデルを用いたメタン乱流拡散火炎の簡易シミュレーションを行う事により、燃焼素反応を考慮しない場合の簡易シミュレーションの妥当性、及び各計算パラメータの燃焼特性(火炎高さ・火炎温度)に及ぼす影響についても考察を行った。

2. 数値解析法及び解析条件

本研究におけるメタン乱流拡散火炎のシミュレーションには、熱流体解析ソフト(Phoenix Ver. 3.5 (株)CRC総合研究所)を用いた¹⁾。

実際の計算に際してまず、メタン燃焼反応機構における反応を定義する必要がある。メタンの素反応は100種類以上(代表的な素反応で35種類程度)あり、詳細な計算を実行するには、当然これらの素反応における反応速度定数を条件により設定し、それによる時間経過に対する反応の進行状況をシミュレーションする必要がある。しかし、計算で扱う素反応の数によって大型並列計算機などを用いなければならず、また、計算時間も非常に長くなってしまい、簡易計算には不都合である。したがって、本研究のメタン乱流拡散火炎の簡易シミュレーションにおいては、総括一段反応モデル(中間生成物及び素反応を考慮しないモデル)として数値解析を行った。メタ

ン乱流火炎の総括反応式を以下に示す。



ここで、空気の質量分率は以下の通りとした。

$$X_{\text{O}_2} : X_{\text{N}_2} = 0.232 : 0.768$$

本解析で用いられた Y-Z 二次元円筒座標系でのメタン-空気流入モデル、及び流入口の出口構造を図1に示す。なお、本解析では、火炎位置の変化による計算発散を抑制し、解析時間が軽減されるように、流入口から Z 方向 2m の位置に火炎保持のためのフレームホルダーを設置した²⁾。

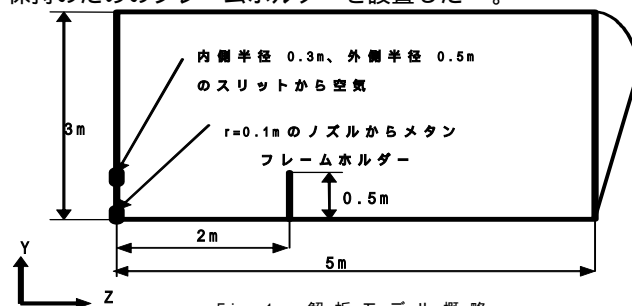


Fig.1 解析モデル概略

3. 解析結果及び考察

表1に本シミュレーションで用いた乱流拡散火炎の、メタン及び酸化剤(空気)の系内流入条件を示す。なお、ここでは、簡易計算の妥当性を評価する為に、実験データが比較的整備されている燃料流入条件(一定)とした。

Table 1 メタン・酸化剤流入条件

| | メタン流入条件 | 酸化剤流入条件 |
|----------------------------|---------|---------|
| 流入速度 [m/s] | 1.0 | 1.0 |
| 流入温度 [K] | 300 | 300 |
| 流入密度 [kg/m ³] | 0.6414 | 1.1627 |
| 流入流量 [kg/m ² s] | 0.6414 | 2.3254 |

図2及び図3に本シミュレーションで得られた酸化剤流入条件 1.0m/s での系内温度分布及び燃料濃度分布の代表例を示す。これらの図から明らかなように、総括一段反応モデルによる簡易計算を行った場合においても、出口直後の火炎温度は 2000K 程度となっており、この値は熱解離を考慮した拡散火炎の断熱火炎温度と一致している(図2参照)。すなわち、簡易計算を行った場合においても、系内温度分布及び火炎温

度に関しては、ある程度正確な値が算出できると考えられる。次に系内の燃料分布に着目してみると、出口直後の火炎存在領域における燃料濃度が噴流下流と比較して同程度となっており、著しい燃料消費域が観察されなかった。当然これは、総括一段反応での簡易計算の為、実際の燃料消費域が下流側に移行した為と考えられる。

総括一段反応モデルを用いた場合の、燃焼特性に及ぼすシミュレーション結果の妥当性を評価する為に、本計算で得られたメタン乱流拡散火炎の酸化剤流入速度に対する火炎高さを、Z軸計算範囲をパラメータとして図4に示す。この図から明らかなように、火炎高さはどの計算範囲においても、酸化剤流入速度4.0m/sまでは火炎高さが増大し、その後、酸化剤流入速度の増大に伴って減少し、酸化剤流入速度8.0m/sの場合には、火炎の吹き飛びによって火炎高さは0mとなり、この傾向は、定性的に実験事実と一致している。しかし、本来火炎高さは、Z軸計算長さに依存せず、一致しなければならない。ここで、計算範囲による火炎高さの差異について着目してみると、酸化剤流入速度が4.0~6.0m/sにおいて、その差異が比較的増大し、最大45%程度になっている。したがって、総括一段反応モデルを用いた簡易シミュレーションの場合には、Z軸計算範囲の変更による燃焼特性に及ぼす影響の要因を特定する必要が示唆される

また、同様に総括一段反応モデルを用いた場合の、燃焼特性に及ぼすシミュレーション結果の妥当性を評価する為に、本計算で得られたメタン乱流拡散燃焼での酸化剤流入速度に対する酸化剤出口温度として、(Y, Z) = (0.45m, 0.45m)の位置での温度を、Z軸計算範囲をパラメータとして図5に示す。この図から明らかなように、出口温度はどの計算範囲においても、酸化剤流入速度2.0m/sまでは酸化剤出口温度が増大し、その後、酸化剤流入速度の増大に伴って減少し、酸化剤流入速度8.0m/sの場合には、火炎の吹き飛びにより、燃料・酸化剤流入温度とほぼ等しくなっている。ここで、各Z軸計算範囲による出口温度の差異について着目してみると、吹き飛び限界近傍の酸化剤流入速度6.0~8.0m/sでは、当然一致しており、吹き飛び限界付近での総括一段反応モデルを用いた場合の妥当性が示唆される。ここで酸化剤出口温度は、Z軸計算範囲を拡大することにより、フレイムホルダー後流側の外炎付近から発生する旋回渦の影響が増大する。したがって、酸化剤流入速度が4.0m/s以下の場合には、Z=7.5(計算範囲拡大後)の方が、Z=5.0(計算範囲拡大前)よりも既燃の高温ガスからの旋回流による熱移動により、酸化剤出口付近での温度が増大している事がわかる。この結果から、先のZ軸計算範囲の変更による燃焼特性に及ぼす影響の主要因は、旋回渦による流体力学的特性によるものであると考えられる

4. 結論

本研究では、総括一段反応モデルを用いる事により、簡易シミュレーションの妥当性及び燃焼特性に及ぼす酸化剤流入速度の影響について検討を行った。以下に結果を示す。

- 1) 総括一段反応モデルを用いた簡易計算においても、厳密計算と比較して火炎温度分布に大きな差異は発生しない。
- 2) 簡易計算を用いた場合においても、酸化剤流入速度に対する火炎高さの変化は、定性的に実験事実と一致する。
- 3) 簡易計算を用いた場合には、計算範囲により旋回渦の影響を詳細に検討する必要がある。

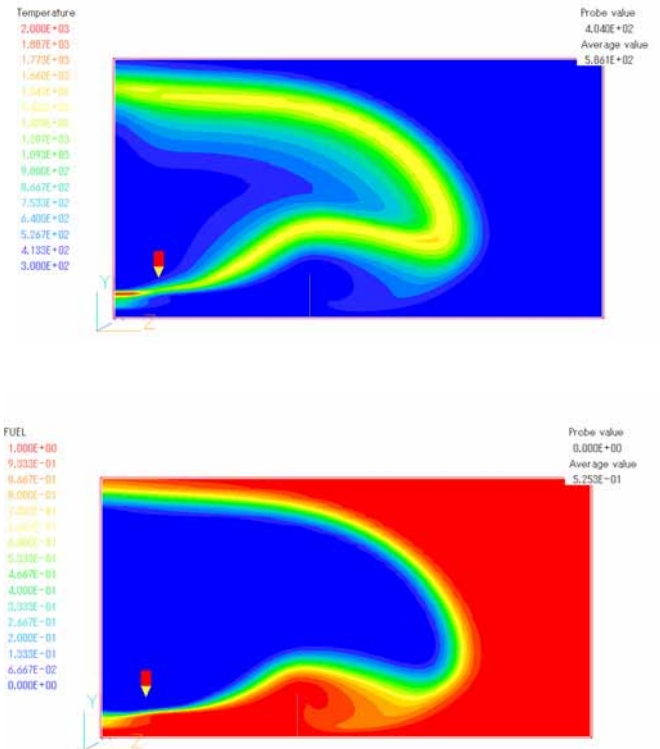


Fig.2 温度分布

Fig.3 燃料濃度分布

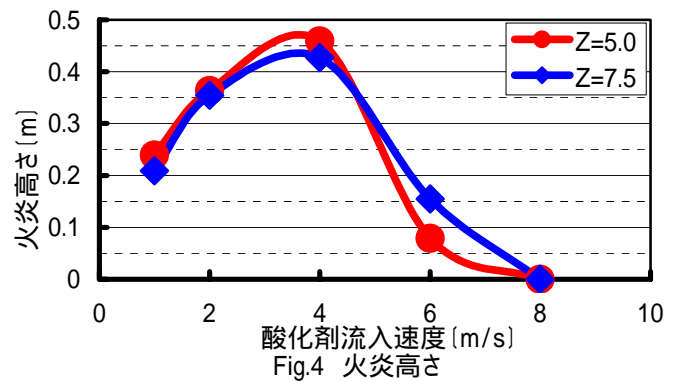


Fig.4 火炎高さ

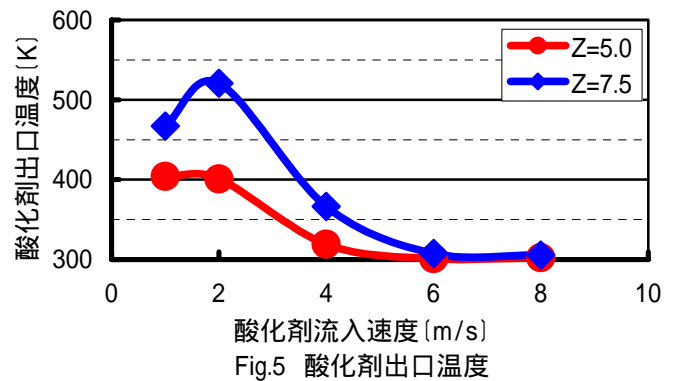


Fig.5 酸化剤出口温度

参考文献

- 1) (株)CRC 総合研究所 : PHOENICS/WorkBook
- 2) CHAM-Japan : PHOENICSver3.5 講習会資料

キーワード.

メタン乱流火炎、数値シミュレーション、総括一段反応

Summary.

**Development of simplified simulation for turbulent diffusion flame
by using model of overall one step reaction formula**

Michihiro Chino

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Tadashige Kawakami

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Numerical Simulations of turbulent diffusion flame for methane in air have been carried out to examine the behavior of temperature, concentration of fuel and distribution of velocity near the flame holder by using model of overall one step reaction formula. Initial conditions for turbulent diffusion flame for methane correspond to 300 K and 0.1 MPa and a mixture of 79% nitrogen and 21% oxygen by volume is used as a substitute for air.

The research results show that 1) The highest calculated value of temperature near the flame holder is of the order of 2000 K 2) The model of overall one step reaction formula is fairly useful for determining the combustion characteristics of turbulent diffusion flame.

Keywords.

Turbulent Diffusion Flame for Methane, Numerical Simulation, Overall one step reaction formula