

課題名 (タイトル) :

スーパーコンピュータを用いた乱流予混合燃焼の研究

利用者氏名 : 錦 慎之助

所属 : 本所 情報基盤センター

## 1. 本課題の研究の背景、目的

地球上で使われているエネルギーの 80% 以上は石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料の燃焼によって得られている。燃焼で発生する二酸化炭素  $\text{CO}_2$  は地球温暖化の主要原因とされ、排出量を削減することが世界的な課題となっている。 $\text{CO}_2$  削減のための手段の一つとして、燃焼効率を向上させるための技術開発・研究が重要な課題となっている。

本研究でターゲットにしている乱流予混合燃焼とは“乱流”と“燃焼”が相互に干渉する非常に複雑な現象である。乱流予混合燃焼は最新の火力発電所ガスタービン燃焼器等で見られる現象で、広く工業的に利用されている現象ではあるが、その現象の複雑さのため十分な解明や論理的な説明がなされていないのが現状である。一方、急激な熱発生を有する乱流予混合燃焼中では逆勾配拡散の発生が観察されており、この物理現象の詳細な検証を行うことは、物理的な現象の解明とともに、乱流予混合燃焼特有の現象を考慮した燃焼モデルの開発にも必要不可欠である。実験によって乱流予混合燃焼の詳細な物理情報を 3 次元空間で入手することは極めて困難であるため、本課題では、直接数値シミュレーションを実行し、乱流予混合燃焼データベースを構築することで、乱流予混合燃焼の現象の理解と新しい知見を得ること、精度の良い乱流燃焼モデルの提案を行うことを最終目的としている。

今年度は、乱流強度を以前の計算条件に比べて大きくした計算を実行した。しかしながら、計算領域内での計算上の問題による圧力波の発生や、さらに乱流強度を大きくした場合には数値計算が発散する現象が見られた。このため、これら問題を解決する手段の検討を行った。一方、省エネルギー燃焼を実現するために、未燃焼ガス温度を 600K、900K とした条件での乱流予混合燃焼の計算を実行し、未燃焼ガスの温度上昇が、燃焼効率を向上させる乱流燃焼速度に与える効果について検討を行った。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

計算には、超並列 PC クラスタを利用した。計算領域の概略図を図 1 に示す。乱流速度場を持った未燃焼ガスを図の左側から流入させて、燃焼後、燃焼ガスが右側へ流出する。x 方向に流入・流出を扱うため、空間微分には 6 次精度中心差分法を用いた。一方、周期境界条件を適応する y, z 方向にはスペクトル法を用いた。時間積分は 3 段階ルンゲ・クッタ法を用いた。領域分割は差分法を用いる x 方向で行い、MPI により並列計算を実行した。なお、y, z 方向の領域長さは 4mm、x 方向の領域長さは、計算条件により 7mm から 12mm とした。

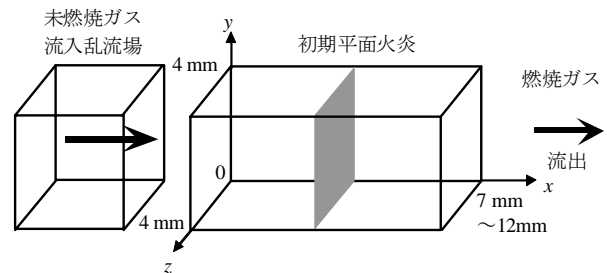


図 1 乱流予混合燃焼の計算概略

## 3. 結果

## 3. 1. 圧力波の発生と対策

乱流強度を大きくした計算 ( $u' = 1.29 \text{ m/s}$ ) では、図 2 に示すように計算領域内で圧力波の発生が見られた。これは、数値計算の不安定性から発生する問題であり、乱流燃焼モデリングを行う際の致命的な問題となる。過去の経験上、火炎が出口側境界に接近すると、このような圧力波が発生し、計算領域、特に x 方向の領域を拡張することで、圧力波の発生を抑制できる。そこで、x 方向の領域長さを 9mm から 12mm に拡張して再度計算を行った。この結果、図 3 に示すように圧力波の発生を抑えることが出来た。図 4 は火炎面 (温度の等値面) の様子を示す。以前の乱流条件に比べて、より深く鋭い形状の乱流火炎となっている様子が見られた。なお、この計算は現在も継続中で、もう暫く計

算を継続し、圧力波の問題を解決できたことを確認した後、データベースの詳細な解析と乱流燃焼モデリングを実施する予定である。

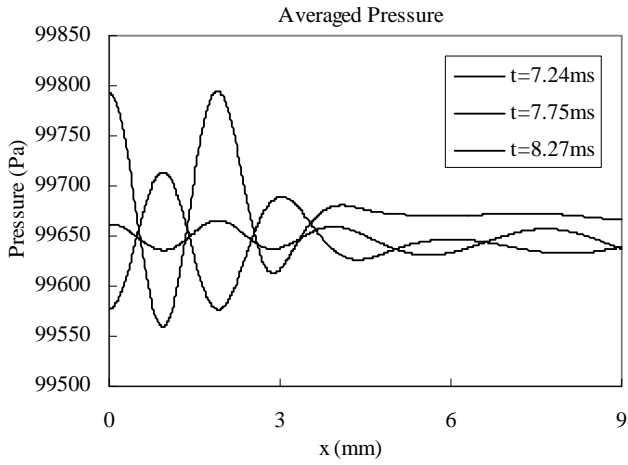


図2 圧力波の発生

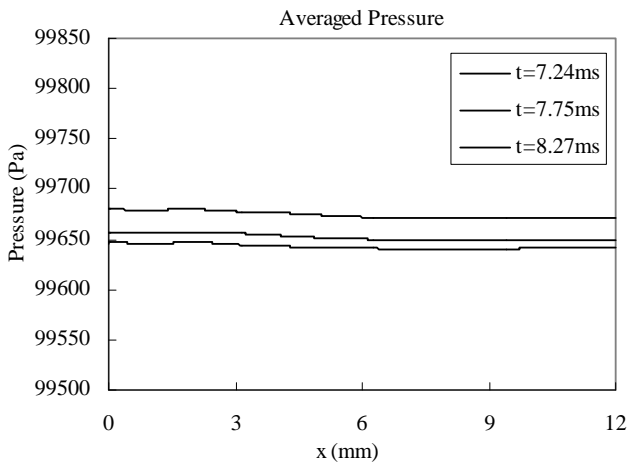


図3 圧力波の抑制

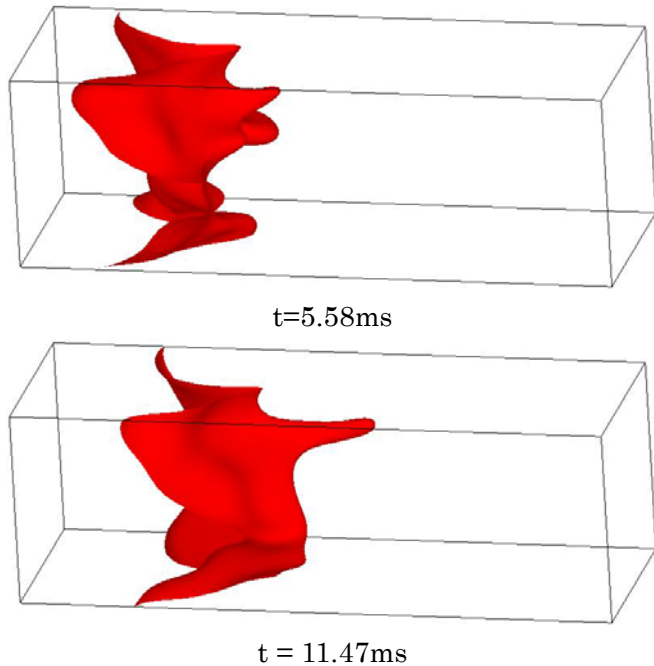


図4 乱流火炎の様子 (1020K の等値面)

### 3. 2. 乱流強度を大きくした場合の計算の発散

他の乱流燃焼研究者から提供を受けた乱流場を用いた乱流予混合燃焼の計算を実行した。乱流強度は、さらに大きい条件となり、 $u' = 3.44\text{m/s}$  である。この条件では、計算開始後に計算が発散 (破綻) してしまった。時刻幅や  $x$  方向の空間刻み幅を小さくするなどの対策を行ったが、現時点で、問題の解決が出来ていない。今後、 $x, y, z$  方向の空間刻み幅を細かくして、高い計算精度で計算を実行する予定である。これには、格子点数の増加と時刻幅の縮小に伴う、計算負荷の増大が見込まれるため、計算時間を短縮するために、さらに高並列化を施す必要がある。すでに  $x$  方向の領域分割はこれ以上できないため、スペクトル法を用いる  $y$  または  $z$  方向に 1 ノード内での並列化 (OpenMP か自動並列) を施すことを検討している。これらは次年度以降も検討を継続する必要がある。

### 3. 3. 初期温度を高くした条件の計算

省エネルギーや低環境負荷の燃焼器開発のために、超過エンタルピー燃焼や高温空気燃焼が研究されている。これまで私が行ってきた乱流予混合燃焼の計算では、未燃焼ガス温度を室温の 300K としていたが、未燃焼前ガス温度を 600K、900K とした条件での乱流予混合燃焼の計算を実行した。この結果、乱流燃焼速度が図 5 に示すような結果を示し、初期温度を高くすることで、乱流燃焼速度が向上している様子が見られた。乱流燃焼速度が向上したということは、燃焼が促進され、高効率の燃焼が行われることを示唆している。

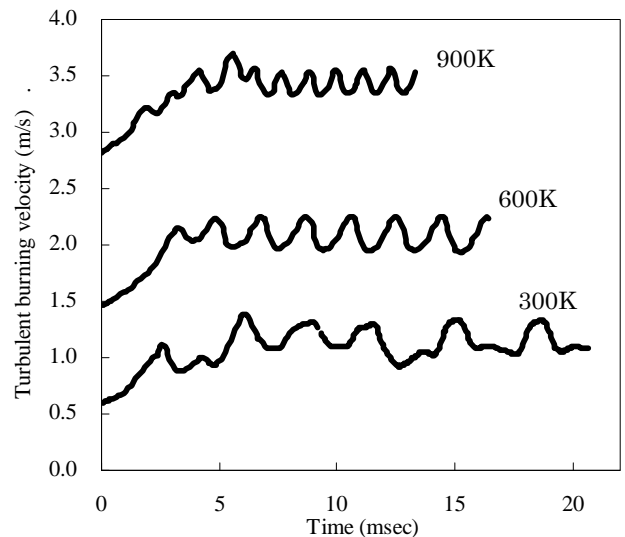


図5 乱流燃焼速度の時間履歴の比較

#### 4. まとめ

本年度は、大きく分けて3種類の計算を行った。

- ・乱流強度を強くした条件  $u'=1.29\text{m/s}$  での計算を実行し、乱流予混合燃焼モデリングを行うためのデータベースの構築を試みた。圧力波の発生が見られたので、計算領域を拡張後、再度計算を実行した結果、圧力波の発生を抑えることが出来た。計算は現在も継続中であるが、データベース構築の目処はついた。
- ・さらに乱流強度が強い条件  $u'=3.44\text{m/s}$  での計算に挑戦したが、格子解像度が不十分であったと考えられ、計算が実行できなかった。これは、格子点数を増やすことで対応できると想定しており、今後の課題である。
- ・省エネルギー燃焼を目標として、燃焼前のガスの温度を高くした条件で計算を行った。乱流燃焼速度の向上が見られ、燃焼が促進されることで高効率の燃焼が行われることを示唆する結果が示された。

#### 5. 今後の計画・展望

今後は下記の2つの課題を実行する予定である。当面は両者それぞれの研究を進め、最終的に、両者を統合した条件の計算を実行する計画である。

- ・乱流強度を強くした条件の乱流予混合燃焼の計算

今年度未完成の  $u'=1.29\text{m/s}$  の計算を早急に完了させて乱流燃焼モデリング等を実施する。さらに乱流強度が強い条件  $u'=3.44\text{m/s}$  の計算を実行する。これにより、実用的な燃焼器レベルに近づいた条件での乱流予混合燃焼の信頼できるデータベースを構築して、現象の理解と乱流燃焼モデリングを行う。

- ・乱流部分予混合燃焼の計算

2010年1月にCNRS(フランス)の研究者と、乱流部分予混合燃焼に関する共同研究の打ち合わせを行った。私の以前の計算では、燃焼前に燃料と空気が完全に均一な濃度で混合されている条件として計算を行ってきた。しかし、実際の燃焼器では燃料の濃度分布(濃度の不均一性)があることが知られている。なお、濃度分布がある状態を部分予混合と読んでいる。そこで、燃料の濃度分布がある状態での乱流部分予混合燃焼の直接数値計算を私が実行し、乱流部分予混合燃焼のモデリングをフランス側で行うという計画で共同研究を開始した。現在は、乱流部分予混合燃焼の直接数値計算を実行するための準備段階であり、完了次第、計算を実行に移す計画である。

6. RICCの継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況(どの程度研究が進んだか、研究においてどこまで計算出来て、何が出来ていないか)や、継続して利用する際に行う具体的な内容

これまでの計算では、乱流強度が比較的弱いことが指摘されていた。乱れ強さ  $u'=1.29\text{m/s}$  の乱流強度を大きくした計算では、計算領域内の圧力波の発生が見られたが、改善策を適応し、ほぼ順調に計算を進んでいる。一方、他の乱流燃焼研究者から提供を受けた乱流場を用いた乱流予混合燃焼の計算 ( $u'=3.44\text{m/s}$ ) では、未だに計算を開始できていない。検討を行った解決策を適応して、計算を実行する計画である。

新たに、乱流部分予混合燃焼の研究をフランスの研究者と共同で遂行する計画である。次年度以降、本格的に乱流部分予混合燃焼の計算を開始する計画である。

#### 7. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

3月4日現在、16万コア時間弱の演算時間が余っている。ジョブの待ち時間等が少なければ、3月末までにほとんどの演算時間を使用する予定である。演算時間を使いきれなかった理由は、 $u'=3.44\text{m/s}$  での強い乱流条件の計算が発散(破綻)し、問題の解決が出来なかったからである。発散の原因の根本的な解決策として、格子解像度の向上を検討しており、喫緊の検討課題として早急に対応を行い、次年度早々には計算を開始したいと考えている。

## 平成 21 年度 RICC 利用研究成果リスト

### 【国際会議、学会などでの口頭発表】

- S. Nishiki, R. Himeno and T. Hasegawa  
Modelling of Transport Equation for Turbulent Kinetic Energy based on DNS of Turbulent Premixed  
Flames in Different Turbulence Conditions  
7th Asia-Pacific Conference on Combustion, May 26, 2009, Taipei, Taiwan
  
- 錦慎之助、姫野龍太郎、長谷川達也  
乱流予混合火炎の直接数値シミュレーション  
日本流体力学会年会 2009, 2009 年 9 月, 東京

以上 2 件は R S C C の利用成果

- 錦慎之助、門脇敏、姫野龍太郎、長谷川達也  
乱流予混合燃焼の三次元直接数値シミュレーション・初期温度 6 0 0 K・断熱火炎温度 2 2 6 0 K の条件・  
第 4 7 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月, 札幌

以上 1 件は R I C C の利用成果