

## ロケットエンジン燃焼器の壁面熱流束予測に向けた壁面モデル LES

報告書番号：R22JFHC0305

利用分野：大規模チャレンジ

URL：<https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2022/20697/>

### ● 責任者

藤田直行, セキュリティ・情報化推進部スーパーコンピュータ活用課

### ● 問い合わせ先

芳賀 臣紀, 研究開発部門 第三研究ユニット (haga.takanori@jaxa.jp)

### ● メンバ

福島 裕馬, 芳賀 臣紀, 伊藤 浩之

### ● 事業概要

ロケットエンジン燃焼器のサブスケール試験を対象とし、壁面熱流束の定量評価を目的とした大規模な燃焼 large-eddy simulation (LES)解析を実施する。

壁面熱流束の高精度な予測は燃焼器壁面の溶損リスクや再生冷却エンジンの吸熱性能の評価に必要なであるが、壁面に発達する乱流境界層を格子で直接解像する wall-resolved LES の計算コストは非常に高く、サブスケール試験の単一噴射器形状でも非現実的である。JAXA ではこれまでに反応を考慮した壁面モデルを提案しており、燃焼器の LES に適用することでその計算コスト削減および予測精度向上の効果を検証する。具体的には壁面熱流束および燃焼圧を評価し、実験値および従来の RANS 解析結果と比較する。また wall-modeled LES(WMLES)に必要な格子解像度についても調査する。

本研究はロケットエンジンを対象としているが、提案手法はその他の燃焼器や反応を伴う壁乱流の解析に適用可能である。本課題の成果は国際会議や学術誌に発表予定である。

### ● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

壁面応力および熱流束をモデル化する WMLES を用いたロケットエンジンサブスケール燃焼器の解析例は少なく、計算規模が増大する格子収束性を調査した例は過去に無い。本課題では、事前解析の約 4 倍の 4 億点規模の格子を用いる。時間積分には並列性に優れる陽解法を用いているため壁面の最小格子幅に制約される時間ステップが小さく、乱流統計量を評価するには少なくとも数百万ステップが必要となる。これまでに JAXA で開発してきた大規模解析用高速ソルバ LS-FLOW-HO と JAXA のスパコン JSS3 の演算性能を組み合わせ

## ● 今年度の成果

### 1. 計算対象

計算対象はミュンヘン工科大(TUM)で実験が行われた単一噴射器のロケットエンジン燃焼器であり、同軸型の噴射器からガスの酸素と水素が噴射される。燃焼室は直径 12 mm, 長さは約 300 mm であり、燃料と酸化剤が混合、燃焼しながら下流のノズルまで流れる。ノズルスロート部において超音速まで加速され、下流境界から流出する。混合比は 5.24 の条件とし、冷却された燃焼器壁面の温度は実験で得られた分布を線形補間して与える。

### 2. 計算手法

高次精度の非構造格子法である Flux reconstruction(FR)法を離散化に用い、燃焼モデルには熱損失を考慮して作成されたテーブル参照型の Non-adiabatic flamelet progress variable モデルを用いる。時間積分には 4 段 3 次精度の Strong-Stability preserving Runge-Kutta 陽解法を用いる。冷却壁近傍に発達する熱乱流境界層の化学組成は、反応速度が速い水素に適した化学平衡を仮定した壁面モデルで評価する。本壁面モデルでは、境界層外層の LES 解をインプットとして与えるため壁面からの距離(マッチング高さ)を指定する必要あり、噴射面から 75 mm 下流の熱境界層厚さ(RANS 結果から評価)の 10% とした。事前解析では、格子解像度が粗いケースで壁面近傍の温度分布が非物理的に低下し、数値不安定が発生した。WMLES 格子では発達途中の薄い境界層の解像度が不足しがちであり、乱流混合が不足すること、壁近傍の温度勾配を高次多項式で近似することによる誤差などが原因と考えられる。本課題では、マッチング高さ以下で SGS 粘性(混合長モデル)を付加するようモデルを修正した。流入境界はレイノルズ数に基づく補正を加えた指数分布の速度を与え、流出境界は超音速流出とした。インジェクタ内部、フェイスプレートは断熱・滑りなし境界とし、燃焼器壁面およびノズルは等温・滑りなし境界を与えた。約 7 ms 計算し、後半の約 5 ms を時間平均した。また、周方向にも平均化を行った。

### 3. 計算結果

図 1 に、事前解析の粗い格子(1 億点)での計算結果と、本課題の細分化格子(4 億点)での計算結果を比較する。WMLES を行うための基準となる格子解像度(境界層厚さに対し各方向に 25 点以上)に対し、粗い格子の格子解像度は、流れ方向、壁面垂直方向、周方向のそれぞれに 10, 72, 20 点と十分ではない。本課題で用いた格子解像度は粗い格子に対して、軸方向と周方向の格子解像度をそれぞれ 2 倍とし、ほぼ基準を満たす格子となっている。図では、壁面以外においても解像度向上の影響が見られ、化学量論混合分率  $Z=Z_{st}$  で表している火炎面により細かな構造が現れている。

WMLES で予測した燃焼器壁面の熱流束と実験値および RANS 結果との比較を図 2 に示す。粗い格子(1 億点)と流れ方向に 2 倍細かくした格子(2 億点)の結果は、噴射面から 0.15 m まで RANS 結果と同等であるが、0.2 m 以降は WMLES の方が低く実験値に近い結果となった。周方向も 2 倍に細かくした格子(4 億点)の結果は熱流束を過大評価する結果となった。格子解像度が不十分な場合に、レイノルズ応力を補うために SGS モデルとして渦粘性を導入したが、格子解像度にかかわらず一定の粘性を与えていることが原因と考えられる。粗い格子での解析では、格子で解像できていない応力を流れ場に追加し、物理的な拡散と計算の安定化が得られていたと考えられるが、十分な格子解像度においては過剰な拡散成分を流れ場に付加され、高温領域がより壁面に近づく結果となった(図 3)。その高温成分を入力として壁面モデルにより壁面熱流束を予測するため、予測値の過大評価につながったと考えられる。燃焼圧に関しては、実験値や RANS よりやや低い値となり、これは格子解像度にあまり依存しない結果となった。

本課題では、目標としていた熱流束の格子収束は得られなかったが、大規模解析による格子依存性を調査することで、サブスケール燃焼器の流れ場における WMLES の誤差原因を明らかにすることができた。また、流れ場の格子依存性については、軸方向よりも周方向の格子解像度が重要であることがわかった。フルスケール燃焼器では噴射器が数百本以上の数百億点規模の解析となるため、WMLES の推奨格子解像度を満たすことは容易ではなく、実用解析に適用するためには粗い格子でも格子依存性が少ないモデルの改良が不可欠である。本課題で得られた乱流統計データを詳細に分析することで、壁近傍 SGS モデルの改良の指針が得られつつあり、今後検証および実問題適用を進めていく。

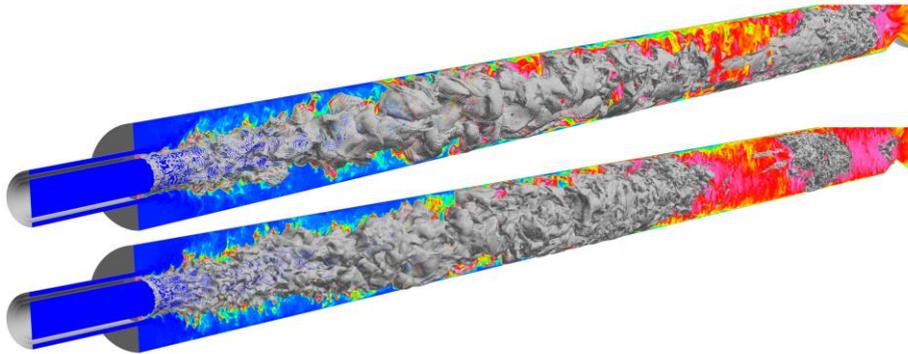


図 1: 事前解析の粗い格子の結果(1 億点, 上)と本課題の細分化格子の結果の比較(4 億点, 下). 化学量論混合分率  $Z=Z_{st}$  の等値面分布と燃焼器断面の温度分布( $300\text{ K} \leq T \leq 3500\text{ K}$  (ピンク))を示している.

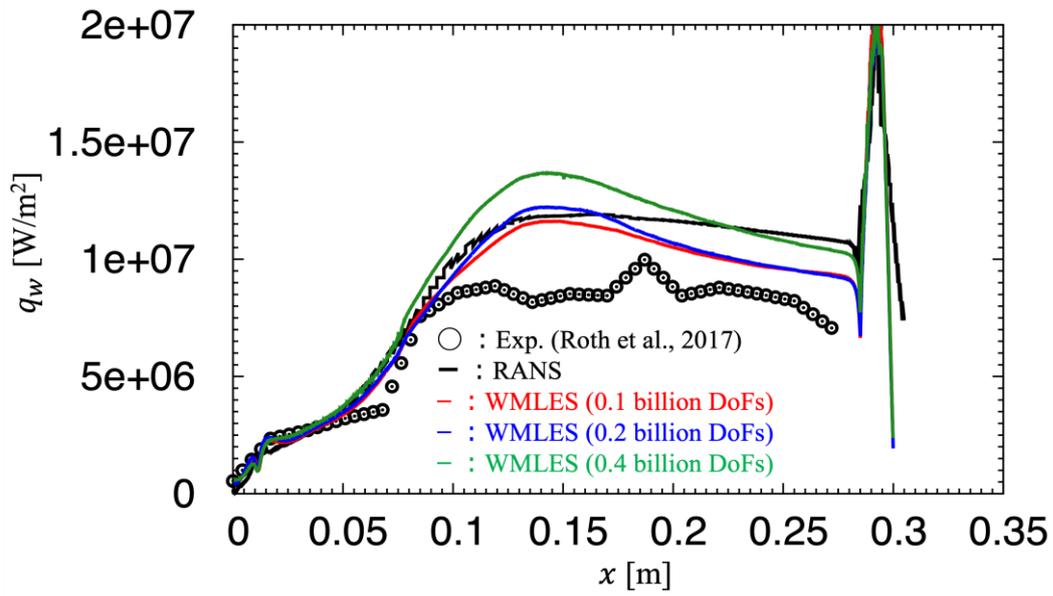


図 2: フェイスプレート位置( $x=0$  m)からノズル出口( $x=0.3$  m)までの燃焼器壁面における周方向平均熱流束分布.

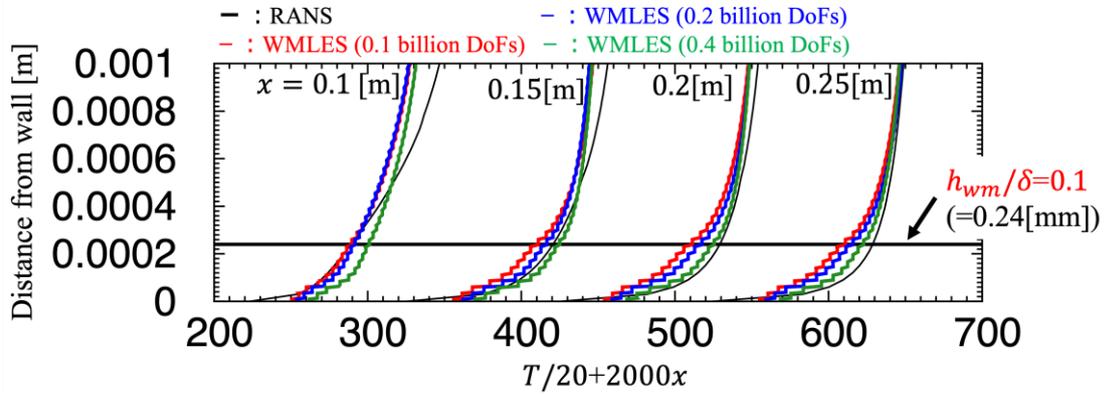


図 3: フェイスプレート位置(x=0 m)からの各軸方向位置における燃焼器壁面近傍の周方向平均温度分布.

● 成果の公表

なし

● JSS 利用状況

● 計算情報

プロセス並列手法	MPI
スレッド並列手法	OpenMP
プロセス並列数	2000
1 ケースあたりの経過時間	482.4 時間

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 1.54

内訳

計算資源		
計算システム名	CPU 利用量(コア・時)	資源の利用割合※2 (%)
TOKI-SORA	42,012,766.00	1.83
TOKI-ST	0.00	0.00
TOKI-GP	0.00	0.00
TOKI-XM	0.00	0.00
TOKI-LM	0.00	0.00
TOKI-TST	0.00	0.00
TOKI-TGP	0.00	0.00
TOKI-TLM	0.00	0.00

ファイルシステム資源		
ファイルシステム名	ストレージ割当量(GiB)	資源の利用割合※2 (%)
/home	158.82	0.14
/data 及び/data2	17,364.71	0.13
/ssd	1,331.06	0.18

アーカイバ資源		
アーカイバシステム名	利用量(TiB)	資源の利用割合※2 (%)
J-SPACE	32.54	0.14

※1 総資源に占める利用割合 : 3つの資源(計算,ファイルシステム,アーカイバ)の利用割合の加重平均

※2 資源の利用割合 : 対象資源一年間の総利用量に対する利用割合

● ISV 利用量

ISV ソフトウェア資源		
	利用量(時)	資源の利用割合※2 (%)
ISV ソフトウェア(合計)	0.00	0.00

※2 資源の利用割合 : 対象資源一年間の総利用量に対する利用割合