

液体ロケットエンジン開発における 数値シミュレーション技術の活用

研究・開発機関 : 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
 利用施設 : JAXA Supercomputer System Generation 2 (JSS2)
 計算規模 : 1000コア/ケース(1ヶ月/ケース)
 利用ソフトウェア : 非構造格子圧縮性流体解析ソルバー「CRUNCH CFD」

Before

- 従来の液体ロケット設計開発では、エンジン燃焼器の冷却特性は実験データに基づく熱伝達率式を用いた1次元解析で評価しており、現象再現性や解析精度が不十分でした。
- 燃焼器の冷却特性を定量的に予測するために、極限環境下におけるマルチフィジクスを考慮して現象を忠実に再現する数値シミュレーション技術の構築が期待されていました。

After

- 液体ロケットエンジンの実燃焼器を対象に、燃焼ガス流れ、固体熱伝導、冷却剤流れを全て3次元で忠実に考慮した熱-流体連成シミュレーション技術を開発しました。
- 解析結果は実燃焼器内の詳細な熱流動場を再現し、冷却特性について十分な精度で試験値を再現することが確認されました。この技術は、H3ロケット開発で活用されています。

背景と目的

宇宙輸送で世界をリードするために、JAXAは2020年初号機打ち上げを目指し新型基幹ロケットH3の開発を関連メーカーと連携して進めています。H3の開発では新型1段エンジンLE-9(図1)の開発が鍵であり、従来よりもさらなる開発期間短縮、高信頼性、低価格を求めて、経験則や多数の試験に頼る従来の設計開発手法を打破し、近年その進歩が著しい数値シミュレーション技術を活用した新しい設計開発手法(「高信頼性開発プロセス」と呼ぶ)を適用しています。



図1 新型基幹ロケットH3とその1段エンジンLE-9

H3ロケット開発に先立ち、JAXAではLE-9エンジンの技術的成立性確認、また高信頼性開発プロセスの構築とそれに必要な数値シミュレーション技術の開発を目的として、2005年からLE-Xエンジンの研究を進めてきました。それに関連して、本稿では液体ロケットエンジン開発の最重要コンポーネントである燃焼器を対象に、その冷却特性を定量的に予測可能とするために構築した数値シミュレーション技術をご紹介します。

■ 利用成果

シミュレーション対象:

対象は液体ロケットエンジンの実燃焼器です。実燃焼器内部は推進薬の燃焼に伴い超高压(1段エンジンでは100気圧以上)・高温(3300℃以上)となるため、冷却が必須となります。燃焼器の冷却は、図2に示す通り銅合金の内壁に複数の細い縦溝を加工した上で、それをNi合金の外壁で閉じて矩形流路を構成し、そこにポンプを介して極低温の燃料(液体水素)を流すことで行います。燃焼器はエンジンの中で最も熱構造的負荷が厳しく、エンジンの寿命を支配します。また、狭い冷却流路内で圧力損失を最低限に抑えつつ、燃焼器壁温を許容値以下に保つことが求められるため、燃焼器の冷却特性に関する定量的予測技術の確立が強く求められてきました。

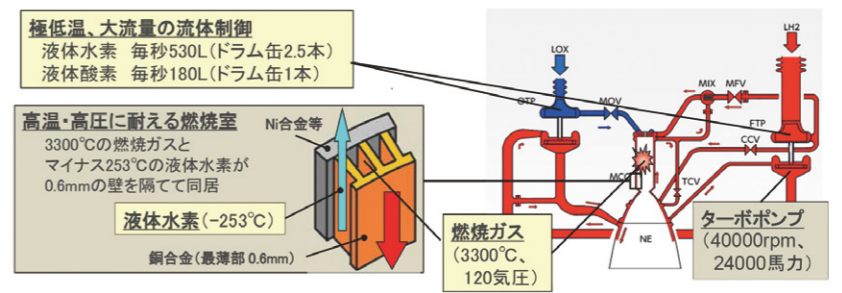


図2 液体ロケットエンジンの構造

そこで本取り組みでは、エンジンの設計開発段階で実燃焼器の冷却特性を高精度に予測可能な数値シミュレーション技術を構築しました。本手法は、解析精度を高めるため、燃焼器内部の燃焼ガス流れ、固体熱伝導、冷却剤流れとその相互干渉を3次元で忠実に再現可能とする世界に類のない熱-流体連成シミュレーション技術です。

解析結果:

図3にエンジン燃焼器全体の温度分布を示します。燃焼ガス流れを見ると、外周の噴射器から噴出した水素と酸素が混合しながら同軸拡散火炎を形成し、その後全断面で燃焼ガスを形成しています。燃焼ガス流れ領域出口付近では、ラバルノズル形状(中ほどが狭まっている砂時計のような形状)により流れが超音速にまで加速し、その膨張効果により燃焼ガスの温度が低下しています。

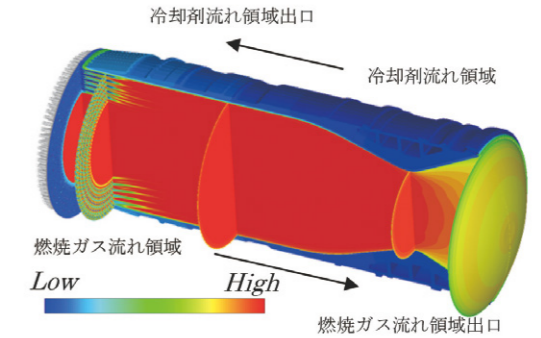


図3 燃焼器全体の温度分布

冷却剤流れ領域を見ると、図中右から左側に向かって流れて行く過程で燃焼ガスから固体領域を介して熱を吸収することで温度上昇し、冷却剤流れ領域出口付近では、冷却剤温度も高いことから固体壁の温度が他の位置に比べて若干高くなっていることが分かります。

この解析結果は実燃焼器内の詳細な熱流動場を再現し、試験値に対する一致も良好であることが確認されました。

今後の展開:

今後はより幅広い作動条件での解析精度検証と改良を進め、究極的には数値シミュレーションでエンジン試作が可能となる世界を目指します。(図4参照)

ここで培った技術や独自開発したソフトウェアを産業界でも活用・展開して行くことを検討しています。



図4 エンジンシミュレーションの将来

出典: <http://www.rocket.jaxa.jp/rocket/h3/>