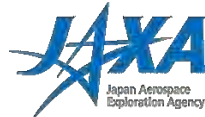


液体ロケットエンジン設計への 流体解析技術の適用



宇宙航空研究開発機構



三菱重工業(株)
航空宇宙事業本部
液体ロケットエンジン設計課

平成24年9月27日

© 2012 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.



目次

NQ-45498
三菱重工

1. ロケットエンジン燃焼器内部の流れ
2. エンジン開発におけるCFDの役割
3. 解析モデル構築の取組み
 - 3.1 ミキサー流れ解析
 - 3.2 燃焼反応流れ解析
4. LE-X燃焼器単体試験へのCFD適用事例
5. まとめ

1. ロケットエンジン燃焼器内部の流れ

水素 毎秒530L (ドラム缶2本半)

酸素 毎秒180L (ドラム缶1本)

噴射器

燃焼ガス

液体水素

燃焼室

2.1m

H-2Aロケット1段エンジン (LE-7A)

重量	推力	燃焼圧
1.8 ton	110 ton	12.0MPa

① 打上げ能力

- ・重量低
- ・燃焼効率高

↓

- ・高温高圧で燃焼
- ・エレメントから同軸噴射
- ・コンパクトな燃焼室
- ・燃焼効率(98%以上)

② 構造強度

- ・高温
- ・高圧

⇒ **冷却溝構造**

- ・薄肉化で冷却性能を向上
- ・高圧の厳しい作動条件

液体水素(30K) 冷却溝

最薄部0.8mm

熱流束

燃焼ガス(3500K以上) (~80MW/m²)

1. ロケットエンジン燃焼器内部の流れ

水素、酸素の同軸火炎

上流の流量分布によりエレメント間で燃焼の分布が発生

水素、酸素の速度せん断層で乱流拡散燃焼

エレメント間の火炎干渉

- ・燃焼効率
- ・燃焼安定性
- ・壁に伝わる熱量

燃焼反応流れ

- ・膨張、加速による組成変化
- ・高速のため非平衡

⇒ 推力

	温度 [K]	圧力 [MPa]
平行部	3600	12
スロート	3300	7.1
ノズル出口	1400	0.04

冷却剤流れ

2次流れによる温度、流速分布

壁温との大きな温度差 ⇒ 境界層での温度勾配大

- ・冷却剤圧損 (エンジン作動点)
- ・壁温 (燃焼室寿命)

伝熱

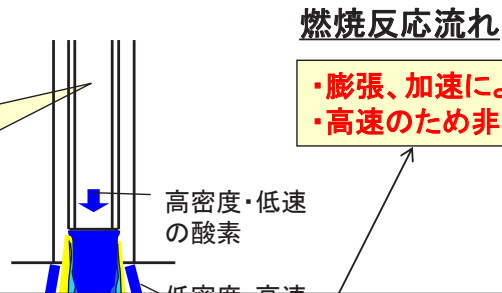
温度分布

1. ロケットエンジン燃焼器内部の流れ

水素、酸素の同軸火炎

上流の流量分布により
 エLEMENT間で
 燃焼の分布が発生

水素、酸素の速度せん断



燃焼反応流れ

- ・膨張、加速による組成変化
- ・高速のため非平衡

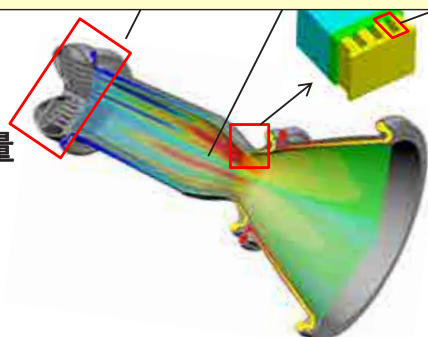
⇒ 推力

	温度 [K]	圧力 [MPa]
平行部	3600	12
スロート	3300	7.1

予測が難しい複雑な現象

- ・経験則(実験式)適用の範囲は限定⇒試験で確認
- ・CFD解析が精度向上に有効

- ・燃焼効率
- ・燃焼安定性
- ・壁に伝わる熱量

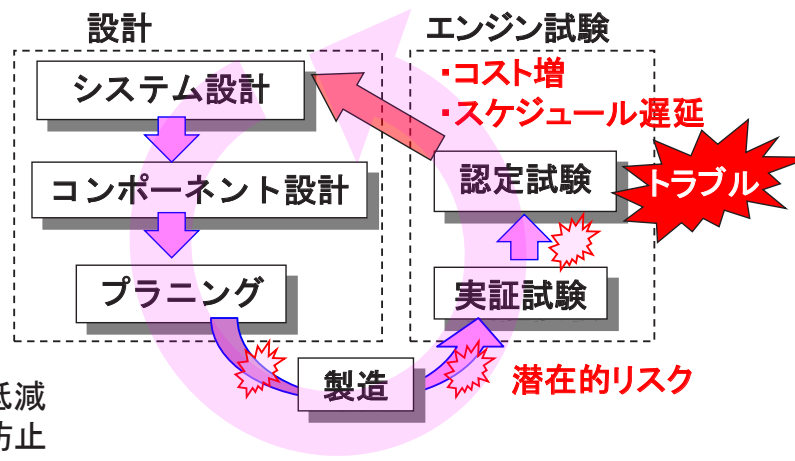


- ・冷却剤圧損 (エンジン作動点)
- ・壁温 (燃焼室寿命)

2. エンジン開発におけるCFDの役割

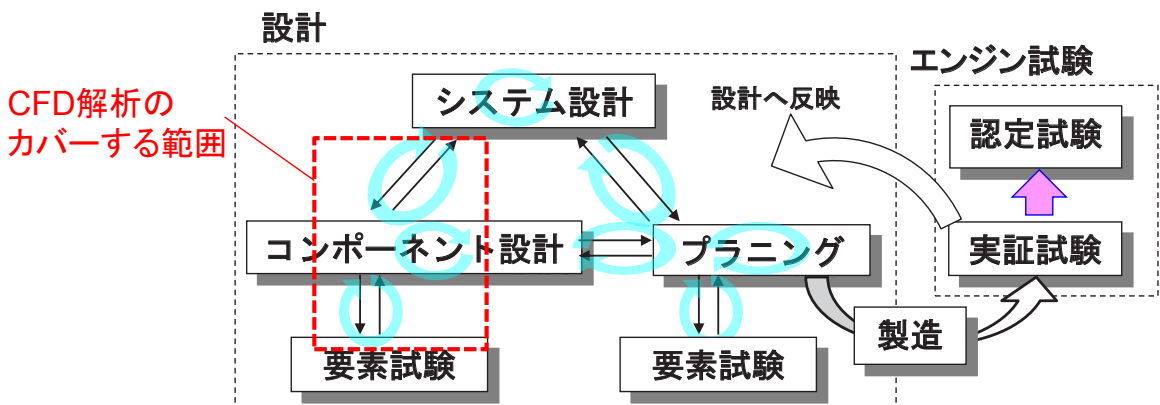
これまでのエンジン開発

試験で確認
 ⇒トラブル発生の場合、
 コスト・スケジュールへの影響大



これからのエンジン開発

高精度解析により事前にリスクを低減
 ⇒試験での大きなトラブル発生を防止

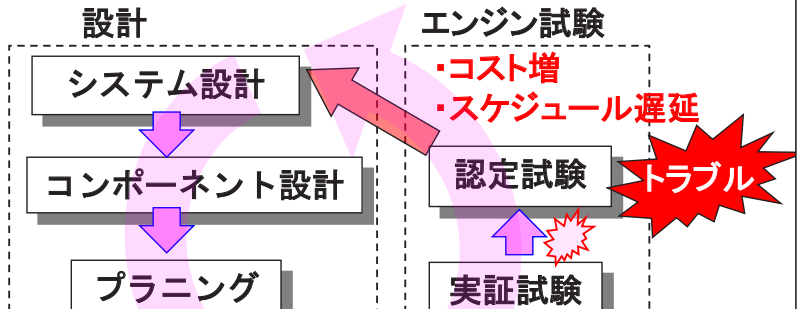


2. エンジン開発におけるCFDの役割

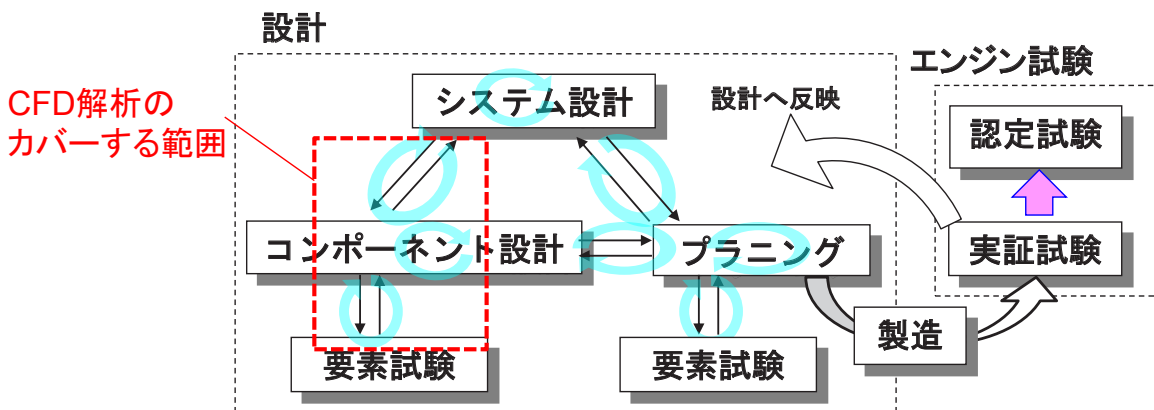
これまでのエンジン開発

試験で確認

⇒トラブル発生の場合、
コスト・スケジュールへの影響大



**JAXA、MHIで高精度CFDモデル開発に取り組み、
研究開発中の新エンジンLE-Xへ適用**

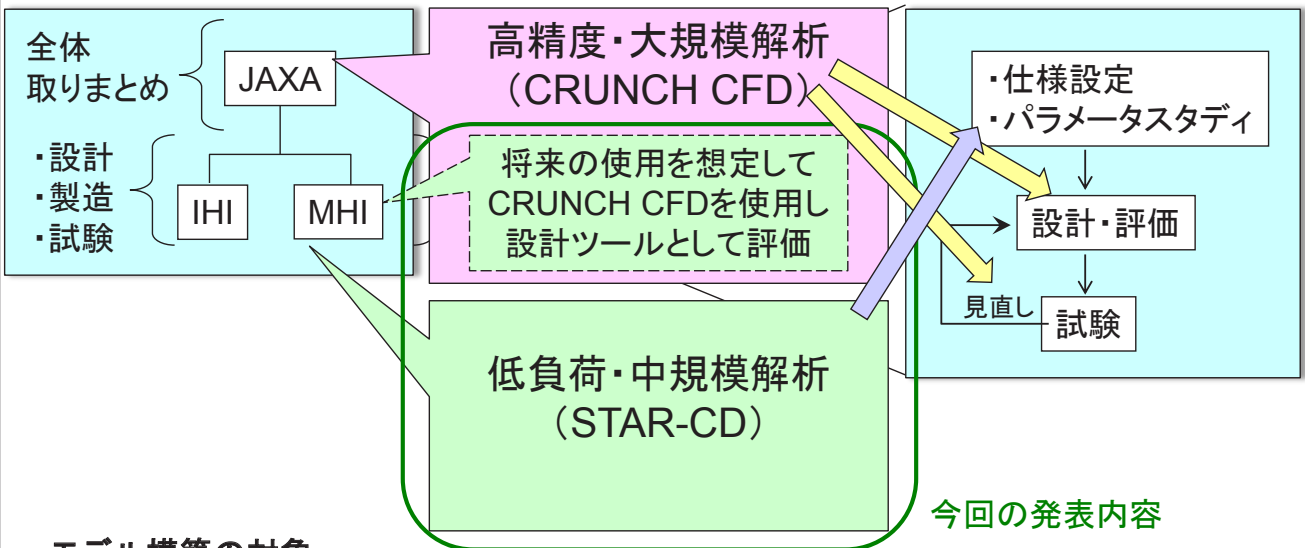


3. 解析モデル構築の取組み

役割

解析への取組み

開発の流れ



モデル構築の対象


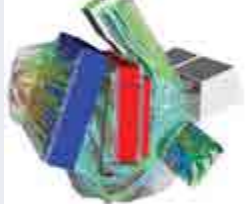
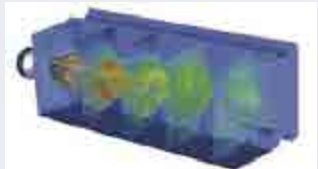
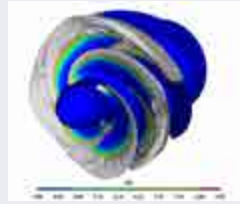
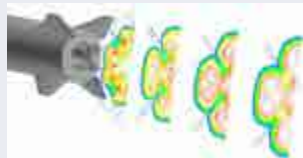

- 噴射器上流 { 酸素ドーム流れ
ミキサー流れ
- 燃焼反応流れ
- 冷却剤流れ

**評価を通して
適用するツール、モデルを決定する。**

今回の発表内容

3. 解析モデル構築の取組み


NQ-45498


	STAR-CD	CRUNCH CFD
特徴	①圧力ベースソルバー	①密度ベースソルバー
	②低マッハ数、非圧縮流れに強い	②高マッハ数、圧縮性流れに強い
	③ユーザインタフェース機能が充実	③ユーザインタフェース機能を整備中
適用	④ユーザサブルーチンで対応	④ソースコードレベルで対応
	⑤MHI計算サーバを使用(~24CPU)	⑤JAXAスパコンを使用(~1000CPU)
解析事例	F1空力  熱交換器内部流  工業用ガスバーナー 	キャビテーション  超音速噴流  噴流の干渉 


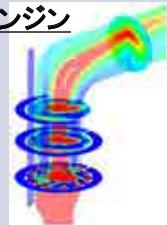


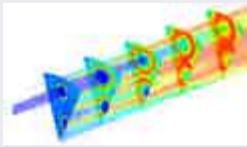
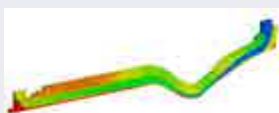
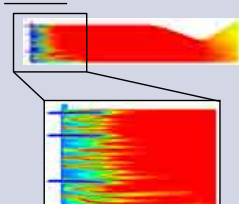

※解析事例は各ソルバーのマニュアルより抜粋

8

3. 解析モデル構築の取組み

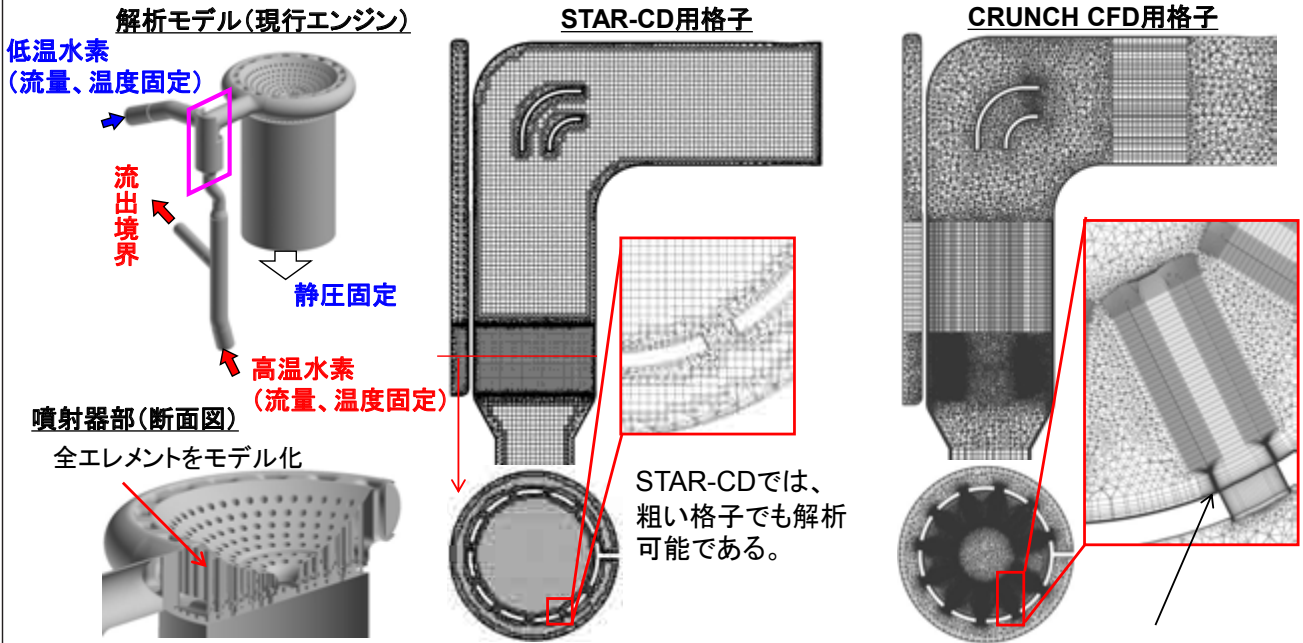
NQ-45498


スケジュール

	酸素ドーム流れ	ミキサー流れ	燃焼反応流れ	冷却剤流れ
2010	サブスケール試験 	現行エンジン 	← 今回の発表内容	
2011	LE-X 	LE-X 	サブスケール試験 	サブスケール試験 
2012			LE-X 	LE-X 

9

3.1 ミキサー流れ解析



解析ソルバー	物性モデル	壁面モデル	乱流モデル	格子点数	解析時間
CRUNCH-CFD	実在流体	壁関数	標準k-ε	1700万点	140hr (400CPU)
STAR-CD	理想流体	壁関数	標準k-ε	700万点	70hr(8CPU)

3.1 ミキサー流れ解析

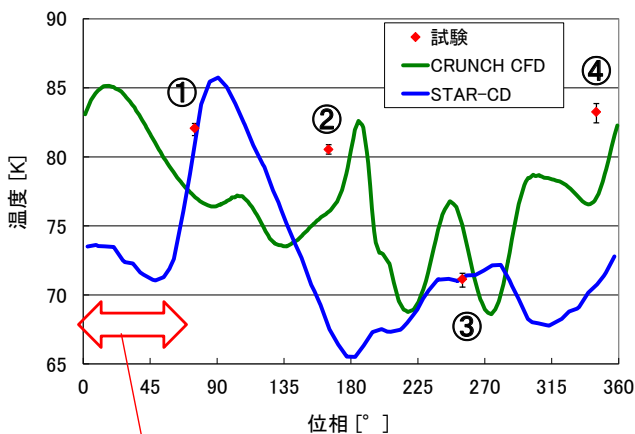
ミキサー下流の温度分布

【試験との比較】

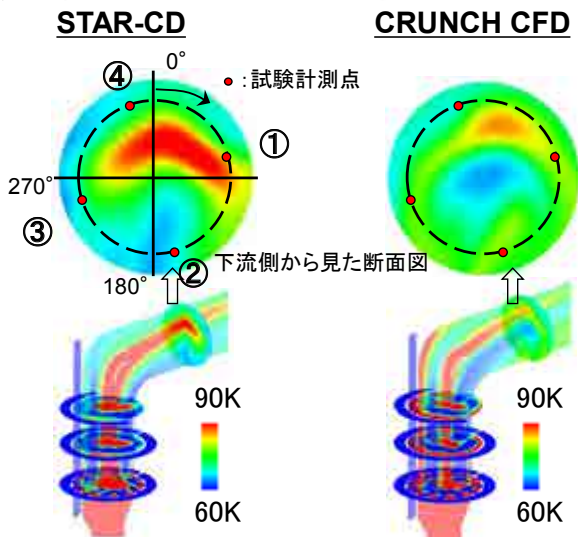
試験では③付近で温度が低い。
⇒CRUNCH CFDでは大まかに傾向を捉えられている。

【解析間の比較】

・CRUNCH CFDの方が④～①付近で温度が高い。
⇒高温領域が壁面に近い影響



CRUNCH CFDの方が温度が高い



3.1 ミキサー流れ解析

噴射器マニホールド内の温度分布

【試験との比較】

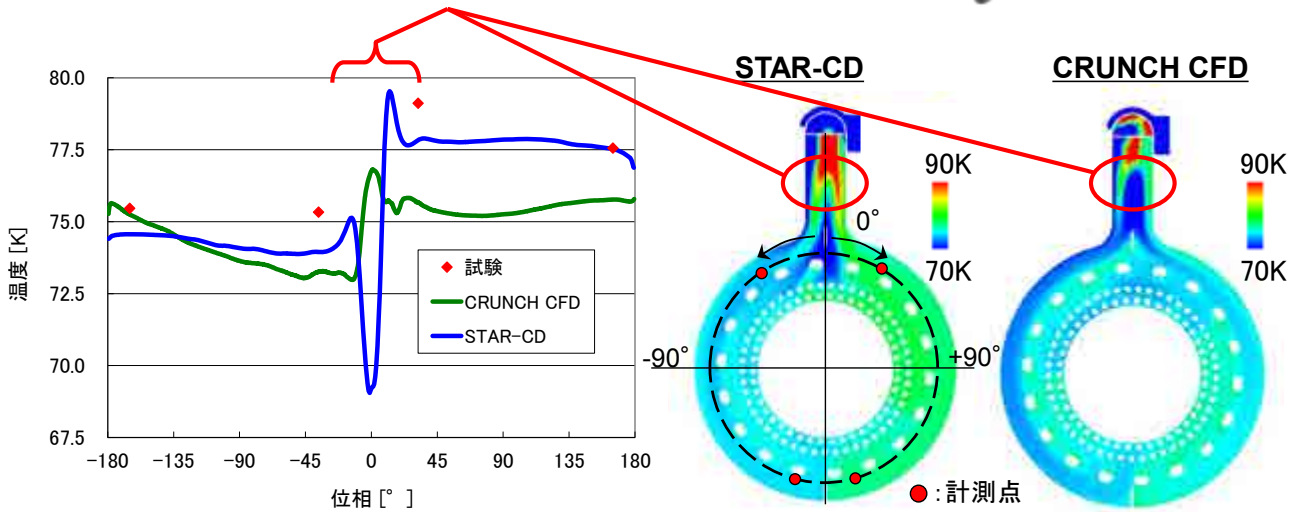
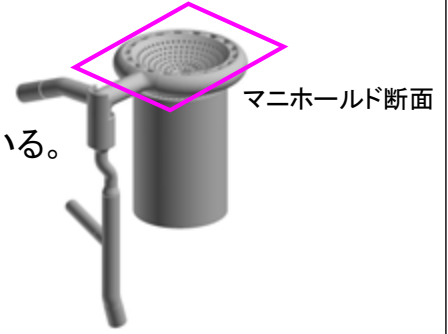
右側の温度 > 左側の温度

⇒ STAR-CD、CRUNCH CFDともに傾向を捉えられている。

【解析間の比較】

入部付近(0度位相)で分布の傾向が異なる。

⇒ 上流配管内の分布の差が影響

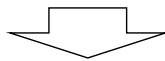


12

3.1 ミキサー流れ解析

現行エンジンは計測点が限定

⇒ 流れ場の検証が十分ではない。




【LE-X燃焼器単体試験】

・2013年実施予定

・計測点を増やし、詳細に精度を検証


LE-X対象の解析

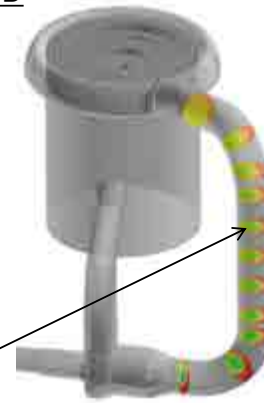
CRUNCH CFD

温度
110K

50K



STAR-CD

温度
110K

50K



高温部の位置が異なる。

13

3.2 燃焼反応流れ解析

サブスケール燃焼試験(水冷却)を対象

- ・噴射面で静圧(燃焼圧)を計測
- ・環状に流れる冷却水の温度上昇から熱流束を算出
- ・燃焼室内面の壁温は冷却水側で構築した実験式から算出

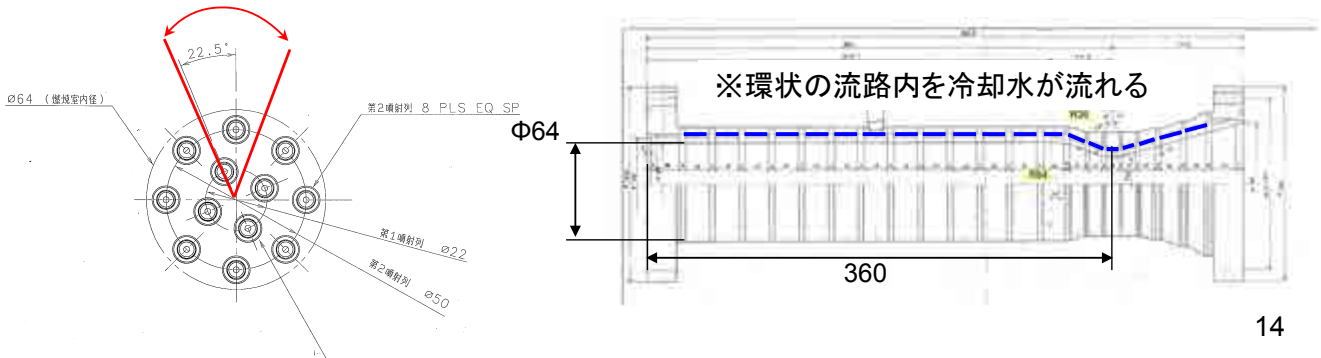
燃焼条件

燃焼圧 [MPa]	5.01
混合比	6.49

エレメント配置

※周方向の対称性から
45度分をモデル化

燃焼室概形状



3.2 燃焼反応流れ解析

【燃焼効率】

流量、スロート面積を試験と合わせて燃焼圧を試験と比較

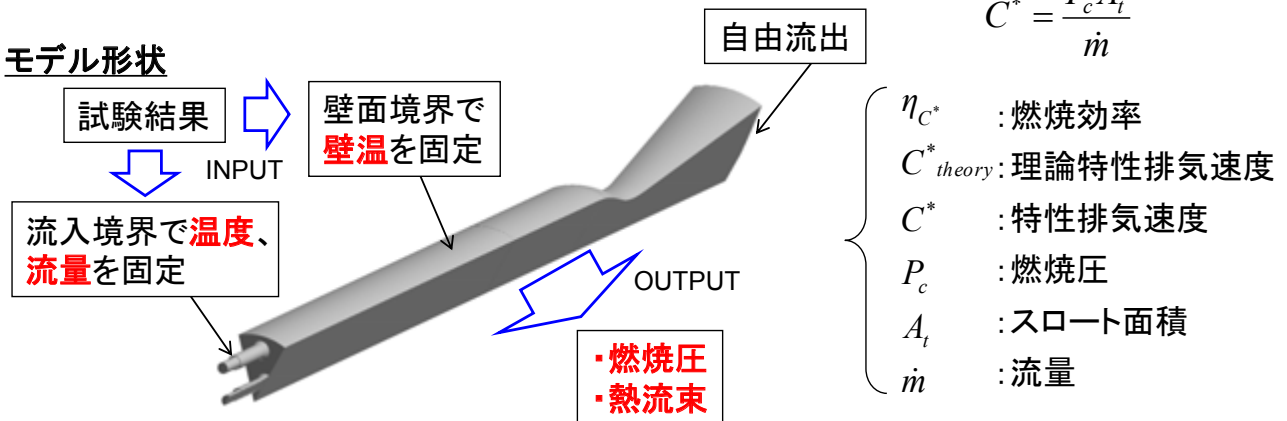
【熱流束】

軸方向分布を試験と比較

$$\eta_{C^*} = \frac{C^*}{C_{theory}^*}$$

$$C^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}}$$

モデル形状



解析ソルバー	物性モデル	乱流モデル	壁面モデル	反応モデル	格子点数	解析時間
CRUNCH-CFD	実在流体	標準k-ε	Near Wall Model	詳細反応	770万点	170hr (400CPU)
STAR-CD	理想流体	標準k-ε	壁関数	詳細反応	90万点	140hr (8CPU)

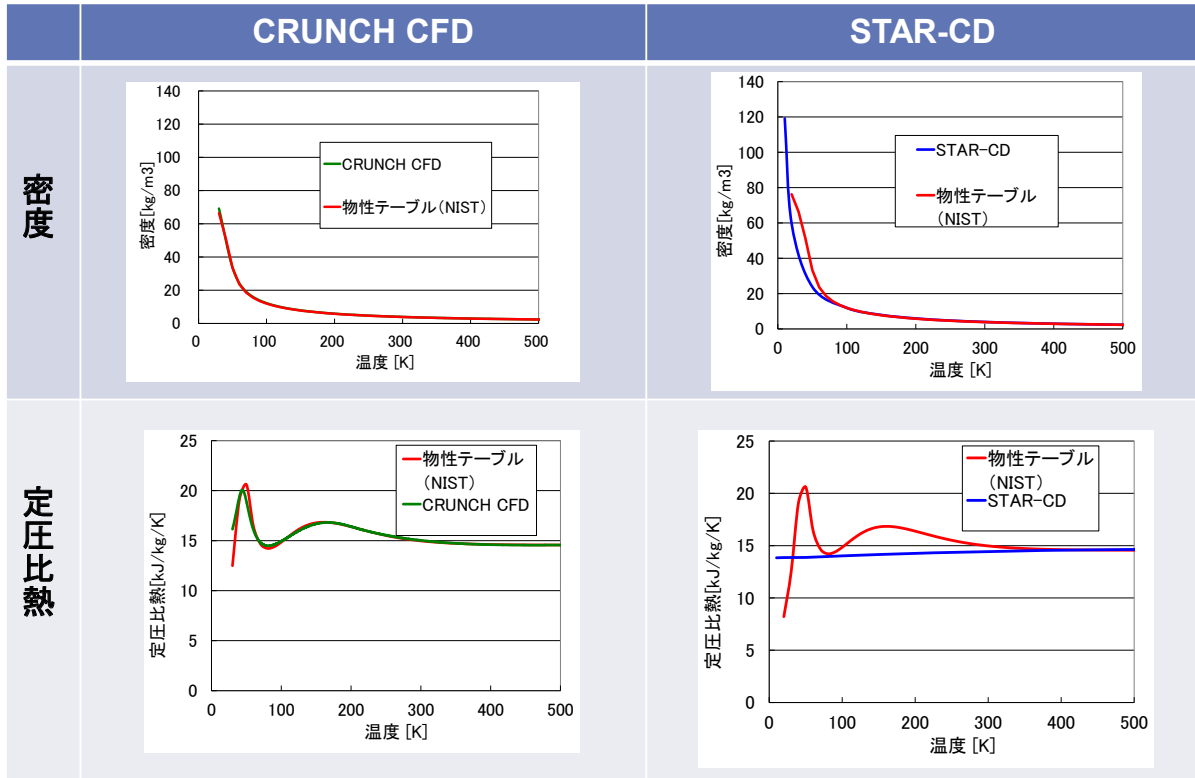
3.2 燃焼反応流れ解析

NQ-45498


理想流体の物性設定


流入温度を調整して密度(運動量)を試験と合わせている。

流入温度	H2温度 [K]	O2温度 [K]
CRUNCH	100.1	98.1
STAR	100.7	17.3



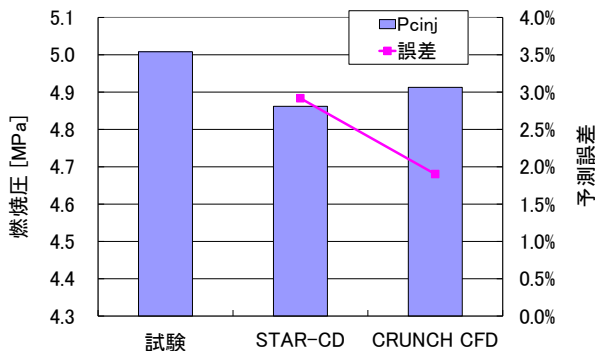
16

3.2 燃焼反応流れ解析

NQ-45498


燃焼圧

- ・試験結果をほぼ再現
- ・CRUNCH CFDの方が試験に近い。

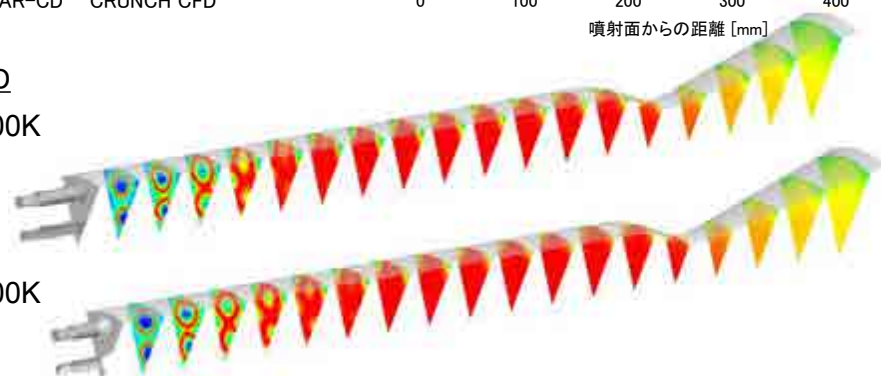


CRUNCH CFD

OK  3500K

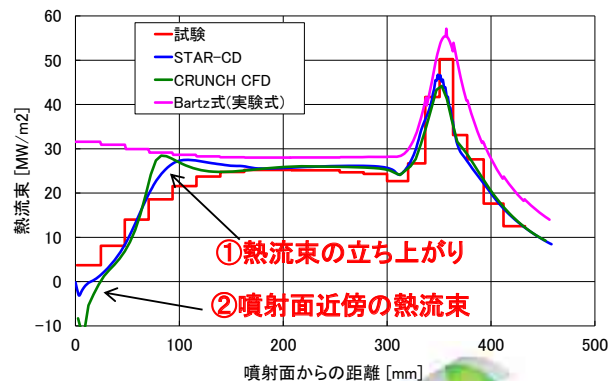
STAR-CD

OK  3500K



熱流束

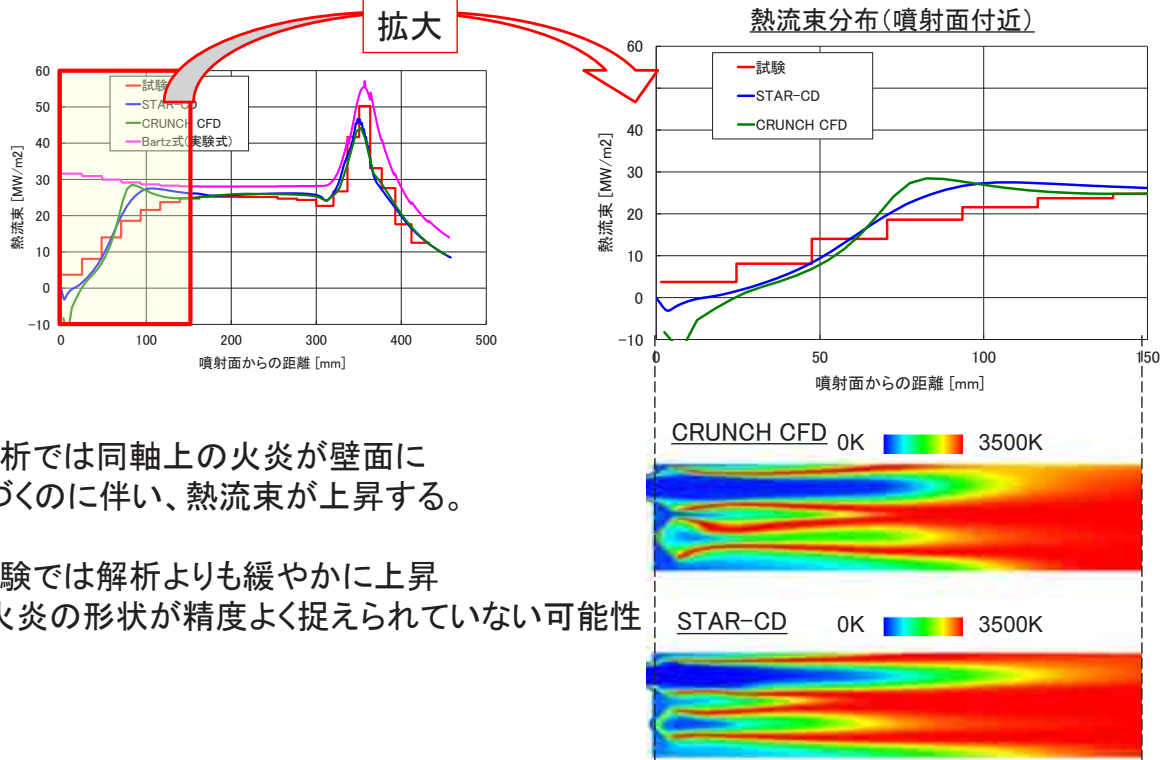
- ・平行部、スロート部の傾向を捉えられている。
- ・CRUNCH CFDとSTAR-CDは同程度である。
- ・噴射面近傍に精度向上の余地あり。



17

3.2 燃焼反応流れ解析

①熱流束の立ち上がり



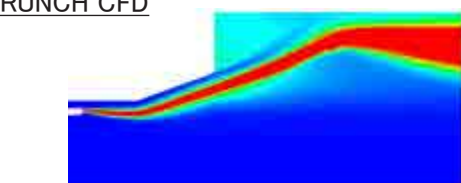
- ・解析では同軸上の火炎が壁面に近づくのに伴い、熱流束が上昇する。
- ・試験では解析よりも緩やかに上昇
⇒火炎の形状が精度よく捉えられていない可能性

3.2 燃焼反応流れ解析

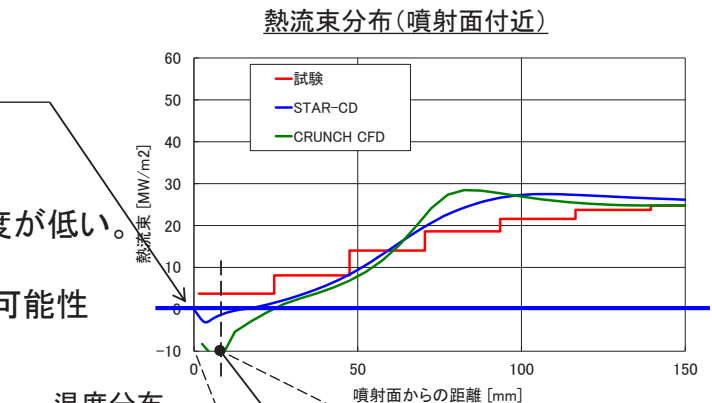
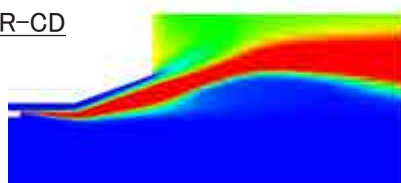
②噴射面近傍の熱流束

- ・流体温度 < 壁面温度となり熱流束が負
- ・CRUNCH CFDの方がSTAR-CDよりも燃焼ガスの拡散が小さく、壁面付近の温度が低い。
- ・循環構造と火炎の干渉が実現象と異なる可能性

H₂O質量分率
0 0.4
CRUNCH CFD

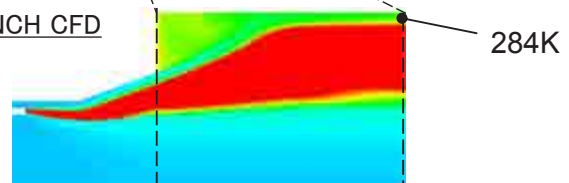


STAR-CD

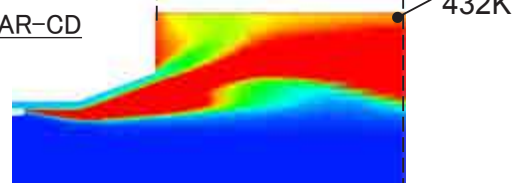


温度分布
0K 500K

CRUNCH CFD



STAR-CD

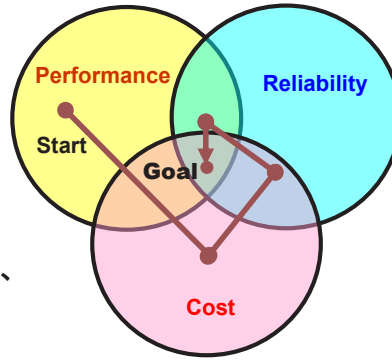


4. LE-X燃焼器単体試験へのCFD適用事例

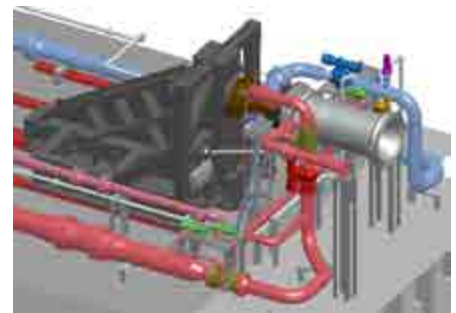
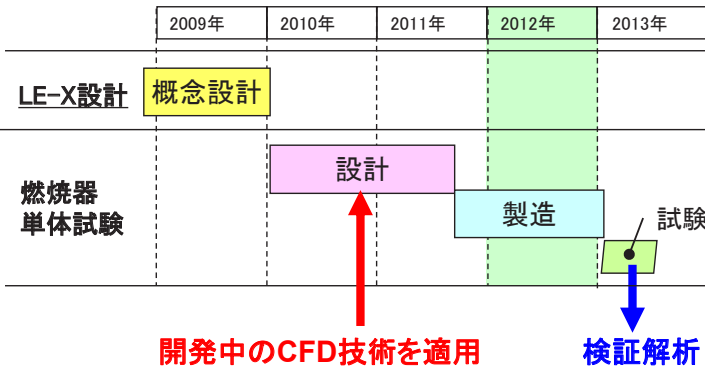
NQ-45498


LE-Xエンジン

- ・次期基幹ロケット用の1段エンジンとして研究開発中
- ・信頼性、コスト、性能のバランスの取れたエンジン
- ・高精度解析を設計初期から適用し、信頼性を定量的に評価
- ・実機大燃焼器の燃焼試験準備中




LE-Xエンジン



燃焼器単体試験のレイアウト 20

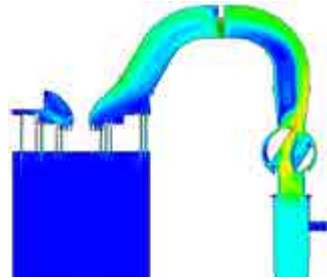
4. LE-X燃焼器単体試験へのCFD適用事例

NQ-45498


酸素側の流量分布

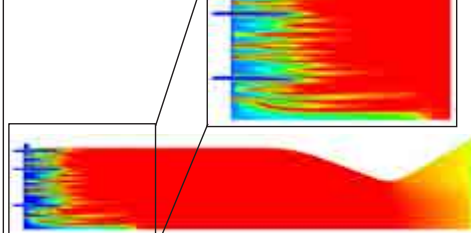


解析モデル(断面図)



流速分布

- ・燃焼効率
- ・熱流束分布

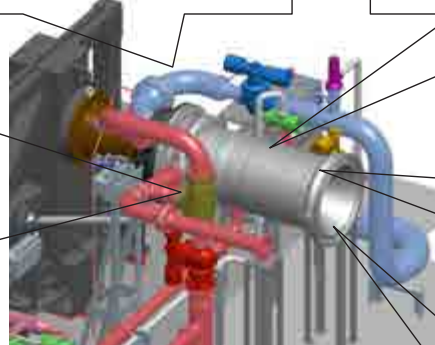


温度分布

水素側の流量分布



温度分布



- ・冷却剤圧損
- ・壁温分布

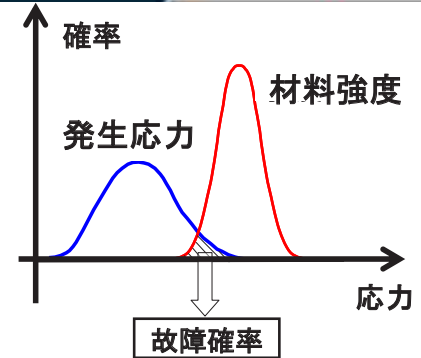
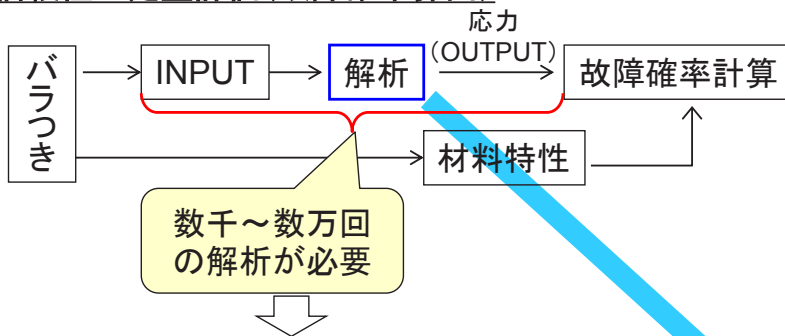


冷却剤流量分布



4. LE-X燃焼器単体試験へのCFD適用事例

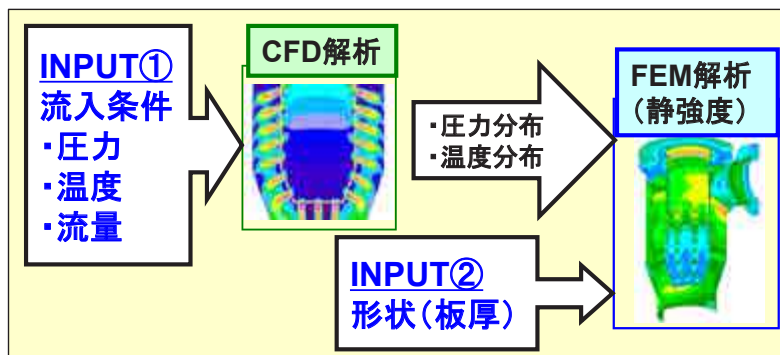
信頼性の定量評価(故障確率算出)



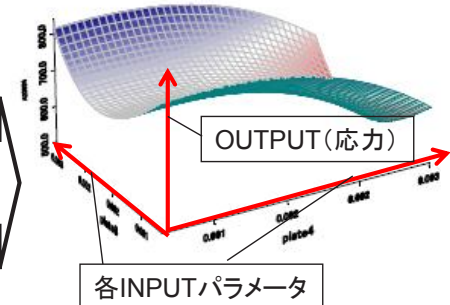
数十回(多数回)の解析によりINPUTとOUTPUTの関係を近似式化する。(応答曲面)

中規模の解析モデルが必要

ミキサーの評価例



応答曲面



22

5. まとめ

- ・JAXA、MHIで燃焼器の高精度CFD解析モデルの構築に取り組んでいる。
JAXA⇒設計の検証に適用する高精度の大規模モデル
MHI ⇒設計に適用する中精度、中規模モデル
- ・要素試験、エンジン燃焼試験を対象に精度を検証し、
エンジン開発における各解析モデルの適用方針が定まりつつある。
- ・特に燃焼CFD解析では、噴射面近傍の熱流束の予測精度に
向上の余地があり、引き続き精度検証とモデル改良に取り組む。
- ・構築した解析モデルは研究開発中のLE-Xエンジン設計に
順次適用されている。

23